This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

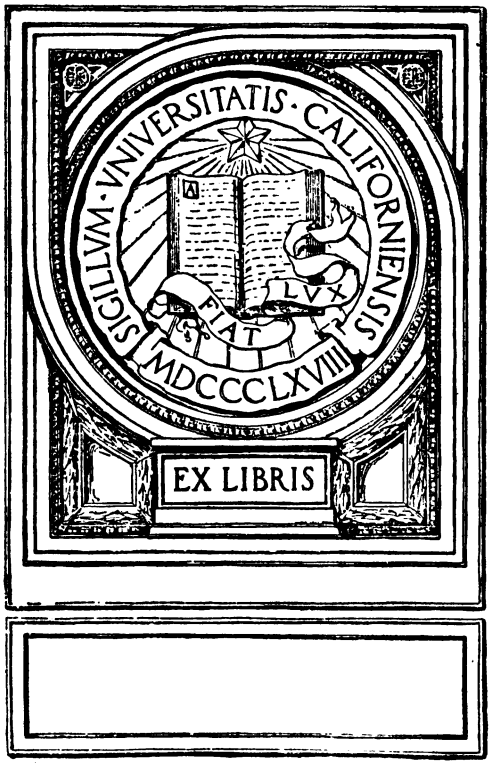
+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

TG
265
A7

YC 12960


SIGILLVM · VNIVERSITATIS · CALIFORNIENSIS
LVX
FIAT
MDCCCLXVIII
EX LIBRIS

Schwächung

des

Arbeitsvermögens der Materialien

durch

Spannungswechsel

von

Friedrich Autenheimer,
gew. Direktor des Technikums in Winterthur.

ZÜRICH 1894
Kommissions-Verlag von **Albert Müller**

F. J. Hesse.

Schwächung

des

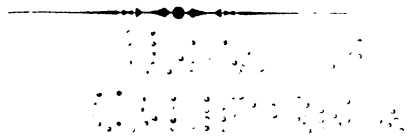
Arbeitsvermögens der Materialien

durch

Spannungswechsel

von

Friedrich Autenheimer,
gew. Direktor des Technikums in Winterthur.



ZÜRICH 1894
Kommissions-Verlag von **Albert Müller**

Druck von J. Schabelitz in Zürich.

Inhalt.

		Seite
1.	Gesetz der Elasticität	2
2.	Versuche von Hodgkinson	3
3.	Anwendung auf eine eiserne Brücke	4
4.	Das Material ist nicht vollkommen elastisch	6
5.	Einfluss der Zeit auf die Aenderung des Molekularzustandes	9
6.	Die Spannungswechsel und ihre Eintheilung	10
7.	Berechnung des Arbeitsvermögens der Materialien	15
8.	Schwächung des Arbeitsvermögens durch Spannungswechsel	17
9.	Die Zeitfunktion	19
10.	Bestimmung der Konstanten der Hauptgleichungen	22
	I. Aufgaben über einfache Spannungswechsel.	
11.	Dauer eines Kurbelzapfens	23
12.	Dauer einer schmiedeisernen Welle	24
13.	Dauer der cylindrischen Wand eines Schiffskessels	24
14.	Dauer der Stangen einer hydraulischen Presse	25
15.	Dauer einer Lokomotivachse	27
	II. Aufgaben über zusammengesetzte Spannungswechsel.	
16.	Dauer der Feder einer Taschenuhr	30
17.	Dauer der cylindrischen Wand eines eingemauerten Dampfkessels	31
18.	Dauer einer Schwungradachse	32
19.	Schwächung des Materials in der Krümmung einer gebogenen Schiene	34
20.	Anwendung auf den Boden eines Dampfkessels	35
21.	Dauer des Sägeblattes einer Bandsäge	37
22.	Dauer eines Drahtseiles zur Kraftübertragung	42
23.	Die Festigkeitsversuche von Wöhler	48
24.	Gleiche Sicherheit von Konstruktionstheilen nach Wöhler und Autenheimer	58
25.	Festigkeitsversuche von Bauschinger	59
26.	Ein Vorschlag. Als Anhang zwei Briefe	61
27.	Schluss	65

324580

Die Lehre von der Festigkeit der Materialien ist eine wohl ausgebildete, soweit sie sich auf die statische Festigkeit bezieht. Kennt man die Natur eines Konstruktionstheiles und dessen Dimensionen, so kann man mit Hülfe der aufgestellten Lehren die Tragkraft des Konstruktionstheiles berechnen und das Resultat der Rechnung wird sehr nahe mit dem übereinstimmen, das Versuche ergeben würden.

Das gilt für neue Konstruktionstheile oder auch solche, die nur kurze Zeit gearbeitet haben. Es gilt auch für Konstruktionstheile, die Jahrzehnte lang in Ruhe gelassen werden oder während ebenso langer Zeit nur wenig zu arbeiten haben. Denn es ist bei solchen Theilen kein Grund vorhanden, warum das Material sich merklich ändern sollte.

Ganz anders verhält es sich mit Theilen, die anhaltend arbeiten, d. h. eine grosse Anzahl Spannungswechsel auszuhalten haben. Bei diesen tritt im Laufe der Jahre eine Aenderung in der Lage der kleinsten Theile, welche das Material zusammensetzen, ein, oder wie sich Poncelet in seiner „Introduction à la mécanique", 1841, ausdrückt, eine „altération moléculaire", pag. 293, oder ein „déplacement moléculaire", pag. 294. Diese Aenderung vollzieht sich, je nach der Art der Spannungswechsel, schneller oder langsamer, jedoch immer auf Unkosten des Arbeitsvermögens des Materials, dergestalt, dass der Konstruktionstheil nach einer bestimmten Arbeitsdauer bei gewöhnlicher Spannung brechen muss.

In der Festigkeitslehre besteht nun eine grosse Lücke: sie vermag die Arbeitsdauer eines Konstruktionstheiles nicht zu bestimmen. Die Frage nach dieser Dauer ist aber eine so wichtige, dass man denken sollte, ein jeder Beitrag zur Lösung derselben, selbst ein unvollkommener, sei willkommen.

I. Gesetz der Elasticität.

Um die allmälige Schwächung des Arbeitsvermögens darzulegen, müssen wir zuerst das elastische Verhalten der Materialien betrachten.

Wenn für die Folge von Spannung die Rede ist, so wird darunter immer die specifische, d. h. die Spannung per Einheit des Querschnittes verstanden.

Wird ein prismatischer Stab mit einer bestimmten Spannung s_0 ausgedehnt, so sollte er, wenn das Material vollkommen elastisch wäre, sich auf seine ursprüngliche Länge zurückziehen, sobald die äussere Kraft einzuwirken aufhört; allein der Stab zieht sich nur um einen Theil der gesammten Ausdehnung zusammen, welchen man den *elastischen* nennt, während der andere die *bleibende* Ausdehnung heisst. Wiederholt man diesen Spannungswechsel und zwar mit Spannungen, die kleiner sind als s_0 oder höchstens gleich s_0, so beobachtet man zweierlei: erstens treten keine permanenten Ausdehnungen mehr ein, und zweitens, es sind die elastischen Ausdehnungen, welche bei den letztern Wechseln entstehen, proportional den aufgewendeten Spannungen. Bei dieser Proportionalität fällt also die durch den ersten Wechsel entstandene bleibende Ausdehnung ausser Betracht.

Steigert man nun aber die Spannung auf einen höhern Betrag s, so bemerkt man, nach Wegnahme der Kraft, wie beim ersten Wechsel, wieder eine bleibende Ausdehnung, so dass die erste um einen neuen Betrag vergrössert erscheint. Unterwirft man nun diesen Stab neuen Spannungswechseln, bei denen jedoch die höchste Spannung den Betrag s nicht überschreiten darf, so macht man bei dieser Serie von Wechseln dieselben zwei Wahrnehmungen: die permanente Ausdehnung bleibt unverändert und es herrscht Proportionalität zwischen den Spannungen und elastischen Ausdehnungen. Ganz dasselbe Gesetz stellt sich ein für jede neue Serie von Spannungswechseln, deren erster eine höhere Spannung hat als s. Doch hört das Gesetz auf, wenn bei einer Serie die höchste Spannung über die Grenze der Elasticität hinausgeht. Ausserhalb dieser Grenze ändern sich Spannung und Ausdehnung nicht mehr proportional; bei Gusseisen, Schmiedeisen und Stahl nehmen nämlich die Ausdehnungen weit rascher zu als die Spannungen, bis zuletzt der Bruch erfolgt. Aehnliches zeigen Aenderungen durch Kompression, Biegung und Verdrehung.

2. Versuche von Hodgkinson.

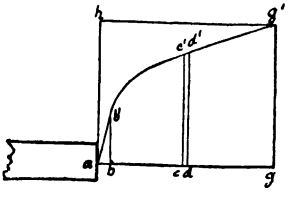
Eaton Hodgkinson unterwarf einen schmiedeisernen Stab von 15 *m* Länge und 1,312 *cm* Durchmesser verschiedenen Ausdehnungen. Die Resultate sind in folgender Tabelle zusammengestellt.

Belastung per 1 qcm.	Ausdehnung per 1 m Länge	
	Total.	Permanent.
kg	*mm*	*mm*
187	0,082	
375	0,185	
562	0,284	0,0025
749	0,380	0,0034
937	0,475	0,0042
1125	0,571	0,0051
1312	0,665	0,0068
1500	0,760	0,0101
1687	0,873	0,0330
1875	1,013	0,0830
2250	2,227	0,2617
2625	9,156	8,4691
3000	17,888	16,5145
3374	24,774	22,7087
3562	34,935	32,8201
3745	Bruch	

Bei den zwei ersten dieser Versuche fehlt die permanente Ausdehnung; gleichwohl existirt eine solche, sie konnte nur ihrer Kleinheit wegen nicht gemessen werden.

Man trage, Fig. 1, die Ausdehnungen als Abscissen *ab*, *ac*, .. *ag* und die entsprechenden Kräfte als Ordinaten *bb'*, *cc'*, .. *gg'* auf; verbinde hierauf die Endpunkte der Ordinaten, so entsteht eine Kurve *ab'c'g'*, welche das Gesetz der Ausdehnung zur Anschauung bringt. Das erste Stück *ab'* der Kurve ist geradlinig. Längs dieses Stückes sind die Spannungen den Ausdehnungen proportional; über *b'* hinaus neigt sich die Kurve rasch gegen die Abscissenachse. Die Tabelle zeigt, dass die Kraft *bb'*, welche bis zur Elasticitätsgrenze reicht, cirka 1500 *kg* beträgt und dass sich bis zu dieser Grenze die Ausdehnung zur ursprünglichen Länge verhält wie 0,76 *mm* : 1000 *mm*

Fig. 1.



oder wie 1 : 1316. Stellt *ag* die Ausdehnung bis zum Bruche dar, so wird *gg'* die Bruchbelastung sein.

Die Kurve ist eigentlich eine *ideale*. Sie entstände, wenn bei einem Versuche die Belastung von Null an stetig wachsen würde bis zum Bruchwerth *gg'*; dann beschriebe der Endpunkt der Ordinate die Kurve *ab'g'*. In Wirklichkeit ist diese Kurve aus einer Reihe von Versuchen in folgender Weise hervorgegangen.

Der Anfangspunkt der Abscisse des ersten Versuches liegt in *a*, dagegen derjenige des zweiten Versuches schon rechts von *a* und zwar um den Betrag der permanenten Ausdehnung, welche während des ersten Versuches eingetreten ist; derjenige des dritten Versuches liegt in gleicher Weise wieder weiter nach rechts u. s. w. Daher rückt der Anfangspunkt der Koordinaten von Versuch zu Versuch vor. Beim zweitletzten Versuch war dieser Punkt schon um 32,82 *mm* von der ursprünglichen Lage entfernt, so dass durch die angehängte Last von 3562 *kg* nur noch ein Weg von 34,93—32,82 = 2,11 *mm* zu durchlaufen war.

Man ersieht aus dieser Darlegung, dass das geradlinige Stück *ab'* während der Versuche vorrückt in neue Lagen. Diese aufeinander folgenden Lagen sind untereinander parallel bis zur Grenze der Elasticität. Wir werden später sehen, dass die Fläche *agg'* das Arbeitsvermögen des Stabes darstellt. Dieses ursprüngliche Arbeitsvermögen nimmt aber durch das Vorrücken der Linie *ab'* von Versuch zu Versuch ab, bis der Stab bricht.

Bei den ersten Versuchen ist die Abnahme des Arbeitsvermögens eine verschwindend kleine, weil die bleibende Ausdehnung kaum gemessen werden kann. Ausserhalb der Grenze der Elasticität wird diese Ausdehnung dagegen gross; also fällt auch der dem Vorgang entsprechende Arbeitsverlust gross aus.

Hodgkinson hat auch schmiedeiserne Stäbe der Kompression unterworfen, ebenso gusseiserne dem Zug und Druck und ähnliche Resultate erhalten. Diese werden auch von andern Experimentatoren bestätigt.

3. Anwendung auf eine eiserne Brücke.

Denken wir uns einen Hodgkinson'schen Stab innerhalb der Grenze der Elasticität gespannt. Nehmen wir die Last plötzlich weg, so zieht sich der Stab zusammen; der Aufhängepunkt der Last nimmt also eine Bewegung an, deren Geschwindigkeit von Null aus wächst bis zu dem Moment, da die zusammenziehende Kraft (Kohäsion) aufhört, d. h. bis zum Anfangspunkt der Koordinaten. Allein hier steht der Aufhängepunkt nicht still, er schwingt sich über

den Anfangspunkt hinaus, indem er den Stab ebenso stark verkürzt als er vorher verstreckt war. Damit hat er eine Schwingung vollendet. Er wiederholt aber diese Schwingung wie ein Pendel und zwar bei vollkommener Elasticität in gleichen Zeiten und in gleicher Stärke, ohne je aufzuhören.

Wenden wir das Gesagte auf eine eiserne Eisenbahnbrücke an, sehen aber dabei von den Spannungen der Theile ab, welche durch das Eigengewicht der Brücke verursacht werden. Die obige Stange sei eine Schiene, welche den Druckbaum mit dem Streckbaum verbindet. Ein Eisenbahnzug gehe über die Brücke. Indem die erste Lokomotivachse an der Stange vorbeigeht, wird diese verstreckt, wir nehmen an, innerhalb der Grenze der Elasticität. Die Achse geht aber rasch weiter und die Schiene hat die Tendenz, nunmehr Längenschwingungen anzunehmen. Diese Schwingungen werden indessen durch andere Theile der Brücke modifizirt. Es lässt sich nun denken, die zweite Lokomotivachse treffe bei der Schiene in einem Momente ein, da ihr Druck die Spannung der Schiene vermehrt, so dass eine Summe von zwei Spannungen entsteht und dass durch eine dritte Achse diese Summe noch gesteigert wird, u. s. w. Wo die Drücke auf die Schiene sehr rasch aufeinander folgen, also bei grosser Zugsgeschwindigkeit, müssen solche Summen und zwar verhältnissmässig grosse entstehen, welche bis an die Grenze der Elasticität des Materials reichen oder sie noch überschreiten. Ein mässiges Gewicht der Lokomotive und eine mässige Zugsgeschwindigkeit werden schon eine bleibende Ausdehnung der Schiene herbeiführen. Eine Vermehrung des Gewichtes der Lokomotive, ebenso wie eine Vermehrung der Fahrgeschwindigkeit werden je wieder weitere bleibende Ausdehnungen bewirken. Alle diese bleibenden Ausdehnungen aber, wie dies der Hodgkinson'sche Versuch lehrt, führen Verluste am Arbeitsvermögen der Schiene herbei.

Wenn an der Schiene im Laufe der Jahre eine erhebliche Ausdehnung nicht wahrgenommen werden kann, so kommt dies daher, dass der Zusammenhang der Brückentheile untereinander dies zum Theil verhindert. Ob übrigens die Formänderung äusserlich an der Schiene erkannt werden könne oder nicht, so muss das Arbeitsvermögen doch abgenommen haben. Denn wenn die vollständige Zusammenziehung der Schiene auch erfolgen sollte, sie ist aber nicht gänzlich durch die Molekularkräfte bewirkt worden, so liegt darin ein Beweis, dass die Wirkung dieser Kräfte sich verändert, resp. vermindert hat.

Man ersieht aus dieser Betrachtung, dass die Theile der Brücke nicht eine Serie von Spannungswechseln durchmachen, bei welchen

die erste auftretende Spannung gleich oder grösser ist als alle folgenden, sondern dass Serien von solchen Wechseln vorkommen und dass jede neue Serie mit einer Spannung, die grösser ist als alle frühern, das Arbeitsvermögen schwächt.

Das gilt selbstverständlich auch von den Theilen anderer Konstruktionen, bei denen im Laufe der Zeit eine Steigerung der Spannung vorkommt.

4. Das Material ist nicht vollkommen elastisch.

Von einer absolut vollkommenen Elasticität des Materials, selbst innerhalb der Grenze der Elasticität, kann nach dem Vorhergehenden nicht die Rede sein. Man müsste jedenfalls, für jede Serie von Spannungswechseln, den ersten Wechsel ausschliessen, der ja eine bleibende Formänderung herbeiführt. Man könnte also nur mit dieser Einschränkung von vollkommener Elasticität reden. Allein auch diese bestreiten wir. Zwar erscheint sie für eine mässige Anzahl von Spannungswechseln als eine vollkommene, ist es aber für eine hinreichend grosse Anzahl nicht mehr.

Zur Vollkommenheit der Elasticität gehört nämlich nicht nur die oben erwähnte Proportionalität, sondern wesentlich auch, dass selbst bei einer grossen Anzahl von Spannungswechseln eine Aenderung im Molekularzustand nicht eintrete. Allein eine solche tritt durch anhaltendes Arbeiten bei Eisen und Stahl ein, indem nach und nach das feinste Gefüge grobkörnig, selbst krystallinisch wird. Die stetige Umbildung des Molekularzustandes erfolgt aber auf Unkosten des Arbeitsvermögens des Materials. Zahlreiche Erscheinungen bestätigen das. Einige besondere mögen hier Erwähnung finden.

Es ist nicht selten, dass ein *Glockenschwengel,* zu dem nur bestes Eisen verwendet wurde, bricht. Indem er an die Glockenwand anschlägt, entstehen in ihm Erschütterungen der kleinsten Theile. Dieses Hin- und Herzittern der Theile im Innern des Schwengels führt eine Neubildung des Gleichgewichtes unter den Molekülen herbei. Jeder Schlag hat seinen Antheil an dieser Neubildung. Der Schwengel breche, nachdem er 100 Jahre Stand gehalten hat. Wird die Glocke 60 Tage im Jahr gebraucht, und macht der Schwengel per Tag 900 Schläge, so beträgt die Zahl der Schläge im Ganzen 5,400,000. Nimmt man das ursprüngliche Arbeitsvermögen pro Kubikcentimeter des Materials zu 5,4 Meter-Kilogramm an, so verliert das Material durchschnittlich per Schlag gerade den millionsten Theil des Arbeitsvermögens. Dieser Betrag

erscheint gross und lässt sich wie folgt erklären: Die hin- und hergehenden Moleküle nehmen bei jedem Anschlagen lebendige Arbeit auf, geben aber auch solche zwischen dem einen Schlag und dem nächsten an die Umgebung ab. Wäre die Abgabe je so gross als die Aufnahme, so würde von Schlag zu Schlag der gleiche Zustand eintreten; allein die Abgabe geht wahrscheinlich langsamer vor sich als die Aufnahme, daher häuft sich die lebendige Arbeit an und mit ihr die Spannung zwischen den Theilen, bis das Läuten aufhört. Von da an hören in kurzer Zeit die Vibrationen im Schwengel auf. Dieses Beispiel zeigt das Bemerkenswerthe, dass die Neubildung des Molekularzustandes und der Verbrauch des Arbeitsvermögens vor sich gehen konnte, ohne dass bisher eine wesentliche Volumen-Aenderung konstatirt worden wäre.

Herr Ingenieur Roman Abt in Luzern theilt uns folgenden Fall mit. „Es war in den ersten Jahren des Betriebes der Rigibahn. Wir untersuchten, wie regelmässig, alle Theile der Lokomotiven. Zufällig traf ein ganz schwacher Schlag die eine *Bremsspindel*. Sie fiel ab wie ein Eiszapfen. Die Bruchfläche zeigte Krystallflächen von Millimetern Länge. Die Maschinen waren drei Jahre im Dienste, das Eisen ursprünglich, wie nachgewiesen werden konnte, bester Qualität. Aber freilich gerade die Bremse machte, wenn angezogen, während jeder Fahrt Hunderttausende von Schwingungen, sie vibrirte.“ Die Umwandlung des Molekularzustandes ging auch da vor sich, ohne dass sie durch eine Formänderung bemerkbar war.

Gerade dieser letzten Thatsache wegen citirten wir die beiden Beispiele vom Schwengel und der Bremsspindel. Ihre Zerrüttung ging allerdings vor sich unter heftigen Spannungswechseln ohne bemerkbare Formänderung. Wenn nun die Zerrüttung bei weniger heftigen Wechseln, mit Spannungen innert der Grenze der Elasticität, eintreten sollte, so wird man schliessen, dass dies um so eher erfolgen könne ohne Formänderung.

Poncelet erwähnt in zwei seiner grössern Schriften, dass sich selbst die vollkommensten *Federn* mit der Zeit erschöpfen (fatiguer). Wer kann das in Abrede stellen? Die Thatsache gilt nicht nur für Federn der Fuhrwerke, der Lokomotiven, sondern auch für die Federn von Apparaten, wie Federwaagen, Dynamometer, Manometer, Uhren u. s. w. Die Federn werden nach und nach schlaff und brechen zuletzt. Auch in ihrem Material geht durch den Gebrauch eine Umgestaltung des Molekularzustandes vor sich, selbst wenn die grössten Spannungen weit unter der Grenze der Elasticität liegen. Das zeugt nicht für absolut vollkommene Elasticität.

Man halte einen *Eisendraht* vertikal hin, befestige ihn am oberen Ende und verdrehe ihn am untern Ende mittelst eines waagrecht aufgesteckten Scheibchens, jedoch so, dass die grösste eintretende Spannung innerhalb der Grenze der Elasticität liegt. Zieht man nun das Scheibchen plötzlich weg, so wird sich der Draht abwickeln, die Anfangslage überschreiten, sich in entgegengesetzter Richtung aufwickeln u. s. w., wie der Draht einer Coulomb'schen Drehwaage; allein nach einiger Zeit wird er aufhören zu schwingen. Etwa wegen des Luftwiderstandes? Dieser kann wegen der Glätte des Drahtes, der Kleinheit des Schwingungswinkels und wegen des Mangels irgend eines hervorragenden Theiles nicht erheblich sein. Die Hauptursache, warum der Drehwinkel abnimmt und zuletzt ganz verschwindet, ist die Unvollkommenheit der Elasticität. Ja es müssten die Schwingungen zuletzt aufhören, wenn sie im luftleeren Raum ausgeführt würden, nur später als in der Luft. Oder glaubt man, dass sie sich im luftleeren Raum unendlich lange ungeschwächt erhalten? Wohl nicht, und zwar wegen der angegebenen Materialbeschaffenheit.

A. Wöhler, Obermaschinenmeister a. D. der niederschlesisch-märkischen Eisenbahn, publizirte anno 1870 Versuche, welche er aus Auftrag des preussischen Ministers des Innern ausführte. Es sollte durch diese Versuche folgendes, von Wöhler aufgestellte Gesetz geprüft werden:

„Der Bruch des Materials lässt sich auch durch vielfach wieder-
„holte Schwingungen, von denen keine die absolute Bruchgrenze
„erreicht, herbeiführen. Die Differenzen der Spannungen, welche
„diese Schwingungen eingrenzen, sind dabei für die Zerstörung des
„Zusammenhanges massgebend."

Der erste Theil dieses Gesetzes spricht für unsere Auffassung, wenn auch Wöhler zum Theil andere Schlüsse aus seinen Versuchen zieht als wir. Dem zweiten Theil seines Gesetzes werden wir ein anderes Gesetz gegenüberstellen. Es liegt uns ob, später ausführlich auf die Wöhler'chen Versuche zurückzukommen.

Jean Résal, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, sagt in seinem Werke von 1892 über „Constructions métalliques", S. 56: „On ne connait que très imparfaitement les propriétés élastiques des matériaux", und S. 45: „Il résulte de cet exposé que les lois et les formules de la théorie de l'élasticité, établies mathématiquement pour les corps parfaitements homogènes et parfaitement élastiques, semblent applicables aux matériaux durs de la nature tant que la limite d'élasticité n'est pas dépassée. Mais il convient de notre que

cette conclusion n'est pas absolument rigoureuse, parce qu'en réalité la déformation permanente n'est probablement jamais tout à fait nulle."

5. Einfluss der Zeit auf die Aenderung des Molekularzustandes.

Von entscheidender Bedeutung für die vorliegende Frage ist die Dauer des Gespanntseins. Ein Wechsel mit lange dauernder Spannung bringt, unter sonst gleichen Umständen, eine stärkere molekulare Aenderung hervor, als ein solcher von kurzer Dauer.

Es werde eine *geradlinige Schiene* in horizontaler Lage am einen Ende eingespannt und am anderen Ende belastet, jedoch so, dass die höchste eintretende Spannung diejenige der Grenze der Elasticität nicht erreiche, so wird sich die Schiene biegen. Lässt die Last nach, so entsteht eine bleibende Senkung. Diese fällt klein aus, wenn der Versuch nur kurze Zeit dauert, dagegen gross, wenn die Belastung lange anhält. Das wird sicher nicht bestritten, wenn man z. B. die eine Dauer auf zehn Sekunden, die andere auf zehn Jahre ausdehnt. Wäre nun das Material vollkommen elastisch, so müssten beide Senkungen gleich ausfallen.

Wird ein *Draht* am einen Ende festgehalten und am andern verdreht, jedoch innerhalb der Grenze der Elasticität, so zeigt sich dieselbe Erscheinung: dauert die Verdrehung nur kurze Zeit, so ist eine bleibende Verdrehung kaum bemerkbar; dauert sie jedoch lange, so wird die bleibende Verdrehung deutlich sichtbar.

Bei dem Umbau eines etwa sechzig Jahre alten Gutofens in der Porzellanfabrik in Nymphenburg mussten die *Reifen der schmiedeisernen Rüstung*, die aus drei Theilen bestehen, auf den grösseren Durchmesser des neu zu errichtenden Ofens aufgebogen werden. Beim Abfahren der Reife nach der Schmiede fiel ein Stück auf den Rasen des Hofes und — zerbrach. Bei näherer Untersuchung fand es sich, dass der ganze Bestand des Schmiedeisens der Ofenrüstung durch und durch in krystallinisches Eisen verwandelt war, das bei jedem Hammerschlag zerbrach (Dingler, 1858, Seite 157). Die Erklärung ist folgende: Man spannt den Reif mittelst Schraube oder Keil vor dem Brande so, dass er gerade leicht anliegt; während des Brandes dehnt sich der Ofen fühlbar aus und spannt den Reif so straff, dass derselbe beim Anschlagen tönt. Nach dem Erkalten des Ofens zieht sich alles wieder zusammen. In einem sechszigjährigen Ofen haben ungefähr 3000 Brände stattgefunden, es haben sich also 3000 Spannungswechsel wiederholt, wodurch die vollständige Erschöpfung des Materials eingetreten ist.

Eine *hydraulische Presse,* welche in Annonay zum Pressen von Papier gebraucht wurde, hatte vier Stangen von gutem Schmiedeisen, welche beim Pressen etwa 800 *kg* per cm^2 gespannt wurden. Die Stangen hielten fünf bis sechs Monate aus, sie brachen unter jenem Zuge, nachdem sie 4000 bis 5000 Mal dieser Spannung ausgesetzt waren. So berichtet Poncelet (Introduction à la mécanique, S. 341).

Eine *arbeitende Locomotivachse* wird gebogen und verdreht. Die Torsion ist jedoch so gering, dass sie ausser Betracht fallen kann. Die Biegung, in Folge des Rahmendruckes, ruft in der Achse eine Verstreckung auf der konvexen, eine Verkürzung auf der konkaven Seite hervor. Die untere Seite ist also auf Zug, die obere auf Druck in Anspruch genommen. Macht die Achse eine Viertelsdrehung, so sinkt dieser Druck auf Null, das Material verkürzt sich daher auf die ursprüngliche Länge. Geht die Drehung um ein weiteres Viertel vor, so macht sich der Druck geltend und es verkürzt sich die betreffende Schicht um ebensoviel, als sie sich vorher ausgedehnt hat. Dieses Ausdehnen und Verkürzen tritt je einmal ein bei jeder Umdrehung. Hat das Rad 4 *m* Umfang und durchläuft der Wagen 1,200,000 Kilometer, bis die Achse ausgewechselt werden muss, so macht diese Achse $1{,}200{,}000 \cdot 1000 : 4 = 300$ Millionen Umdrehungen; also hat jede Schicht zweimal so viel Spannungswechsel ertragen (nämlich die eine Hälfte auf Zug, die andere auf Druck). Allerdings kommen zu diesen Spannungswechseln noch andere hinzu, die später erwähnt werden, die aber den Zusammenhang der Theile mit lockern helfen und ohne welche das Material der Achse noch mehr als 600 Millionen Spannungswechsel aushielte.

Bei der Lokomotivachse wird, wie man sieht, die Zahl der Spannungswechsel sehr gross, weil sie nur kurze Zeit dauern; bei den Stangen der hydraulischen Presse und den Reifen des Gutofens dagegen wird sie weit kleiner, weil sie länger dauern.

6. Die Spannungswechsel und ihre Eintheilung.

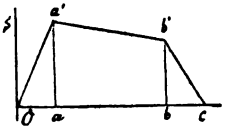
Steigert ein Konstruktionstheil seine Spannung, um nach einer gewissen Zeit zu derselben Spannung zurückzukehren, so macht er einen Spannungswechsel durch. Gehört der Konstruktionstheil einer Maschine an mit regelmässigem Betrieb, so ist dieser Theil gleichen und in gleichen Intervallen folgenden Spannungswechseln unterworfen.

Bei jedem Spannungswechsel treten zwei Grössen auf: Die *Spannung* und die auf den Wechsel verwendete *Zeit.* Um den Einfluss dieser beiden Grössen auf die Schwächung des Arbeitsver-

mögens der Materialien zu beurtheilen, ist es nöthig, die verschiedenen Arten der Spannungswechsel zu kennen.

Zu diesem Zwecke stellen wir die Spannungswechsel graphisch dar, indem wir in einem rechtwinkligen Koordinatensystem die Zeit als Abscisse und die Spannung als Ordinate auftragen. Während dann die Zeit von Null an verfliesst, beschreibt der Endpunkt der Ordinate eine Kurve, deren Verlauf die Eigenthümlichkeiten der Spannungsänderung veranschaulicht. Den Zug zeichnet man gewöhnlich über, den Druck unter der Abscissenachse auf. Es sei t die Zeit und s die zugehörige Spannung. Dann wird in Fig. 2 Oc die Abscissen- und die von O aus darauf Senkrechte Os die Ordinatenachse darstellen.

Fig. 2.



Bei Beginn des Wechsels ist die Zeit = 0, die Spannung sei ebenfalls = 0. Geht die Zeit über in $O\,a$, so wachse die Spannung an zu $a\,a'$; für die Zeit $O\,b$ sei $b\,b'$ die entsprechende Spannung u. s. w. Dadurch entsteht die Kurve $O\,a'\,b'\,c$. Da der Punkt c in der Abscissenachse liegt, so ist nunmehr der Spannungswechsel beendet. Die entstandene Fläche $O\,a'\,b'\,c$ ist das *Diagramm* des Spannungswechsels. Man sieht, dass die Spannung längs $O\,a'$ steigt und längs $a'\,b'$, sowie längs $b'\,c$ sinkt. Dieses Ansteigen und Sinken kann rasch oder langsam, gleichförmig oder ungleichförmig erfolgen. Bei der gleichförmigen Aenderung werden die Linie $O\,a'$, $a'\,b'$, $b'\,c$ geradlinig, was in Wirklichkeit in der Regel der Fall ist.

Wir unterscheiden nun einfache und zusammengesetzte Spannungswechsel und theilen die einfachen ein in Wechsel erster und zweiter Art.

a) *Einfache Wechsel erster Art.* Sie entstehen, wenn die Zwischenzeit $a\,b$ wegfällt. Die Spannung, Fig. 3, steigt also an von o bis s und sinkt sofort bei c wieder auf o. Dabei ist es gleichgültig, ob die beiden Perioden gleiche oder ungleiche Zeit gebrauchen. Es kann auch s positiv als Zug oder negativ als Druck sein. Solche Wechsel, die sich ununterbrochen wiederholten, machte Wöhler mit „Stäben, welche kontinuirlich gedehnt wurden".

Fig. 3.

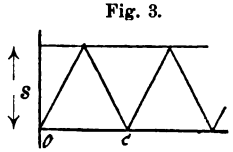
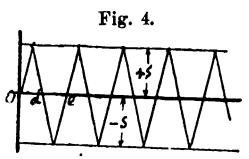


Fig. 4 stellt Wechsel dar, wo Zug und Druck an demselben Material abwechseln. Es steigt also die Spannung von o bis $+\,s$ und geht wieder auf o zurück während der Zeit $O\,d$, sodann von da nach $-\,s$ und wieder zurück nach o während der Zeit $d\,e$. Wöhler machte solche „Versuche mit belasteten Stäben, welche kontinuirlich gedreht wurden".

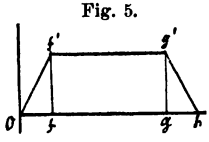
Fig. 4.



Einer Umdrehung entspricht die Zeit Oe; eine und dieselbe Schicht wird also in der ersten Viertelsdrehung gespannt von o bis s, in der zweiten Viertelsdrehung entlastet auf o, im dritten Viertel gespannt auf $-s$ und im letzten Viertel wieder entlastet auf o. Die oben erwähnte Lokomotivachse macht, während sie im Betrieb steht, solche Spannungswechsel durch. Einer Umdrehung entsprechen also zwei einfache Wechsel erster Art.

b) *Einfache Wechsel zweiter Art.* Fällt die Zwischenzeit ab in Fig. 2 nicht aus und ist zugleich die Spannung längs ab konstant, so entsteht der einfache Wechsel zweiter Art. Man könnte diese Wechsel mit dem Namen Dauerwechsel bezeichnen. Das Bild davon ist Fig. 5.

Fig. 5.



Dieses Diagramm findet Anwendung z. B. auf die Stangen einer hydraulischen Presse. Alsdann ist Of die Zeit zum Anspannen, fg die Zeit des Gespanntseins und gh diejenige des Nachlassens (Wasser-Rücklaufes). Die Zeit fg ist in der Regel gross gegenüber den beiden andern Zeiten, daher auch der Einfluss des Gespanntseins auf den Molekularzustand des Materials gross.

Das Diagramm passt auch auf die Spindel einer Schraubenpresse für den Theil der Spindel, welcher zusammengedrückt wird. Man kann sich nur die Fläche unterhalb Oh statt darüber denken.

Das Diagramm entspricht aber auch einem Schiffsdampfkessel, überhaupt jedem Dampfkessel, dessen Dampfdruck über Nacht gänzlich nachlässt. Dann ist Of die Zeit zum Anheizen, fg diejenige des Gespanntseins während der Betriebszeit und gh die Zeit des Abkühlens.

Solche Versuche, bei welchen zwischen der Periode des Anspannens und des Nachlassens eine Zwischenperiode des Gespanntseins vorhanden ist, hat *Wöhler* nicht gemacht. Er bespricht in seinem Memorial an Hand seiner Versuche einzelne Konstruktionstheile, wie Kolbenstangen, Theile von Brücken etc., und lässt sich über die Dampfkessel wie folgt aus: „Diejenigen Theile der Dampfkessel, welche dem Feuer nicht ausgesetzt sind, erleiden bei einfacher cylindrischer Form nur geringe Spannungsschwingungen, welche durch die Schwankungen der Dampfspannung herbeigeführt werden.“ Wöhler ignorirt also den Hauptspannungswechsel, der von O bis h dauert, also vom Beginn des Anheizens bis zum Schluss der Abkühlung; er erwähnt nur die geringen Druckschwankungen, welche während der Betriebszeit fg vorkommen, z. B. ein Steigen von 6 Atmosphären auf 6,1 oder ein Zurückgehen auf 5,9 Atmosphären. Allein die Wechsel, welche durch diese unvermeidliche Druckände-

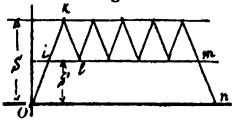
rung entstehen, sind von zweiter Ordnung gegenüber dem Hauptspannungswechsel, ihr Einfluss daher so gering, dass er vernachlässigt werden kann.

Unsere Fig. 5 passt ferner auf eine belastete Achse, wenn diese sich in Ruhe befindet, so auf die Lokomotivachse an Haltstellen, in der Remise u. s. w. An einer Haltstelle z. B. ist die Achse konstant belastet, auf der untern Seite verstreckt, auf der obern verkürzt. Eine Faser auf der Oberfläche der Achse gelange aus der neutralen Lage in die tiefste Lage, was durch eine Viertelsdrehung erreicht wird. Nun sei Of die Zeit zu dieser Viertelsdrehung, nach welcher sofort der Stillstand erfolge, so wird nun diese Faser mit der Kraft ff' gespannt sein, entweder durch Zug oder Druck und das so lange, als der Halt dauert. Diese Faser macht dann beim Anlassen eine erste Viertelsdrehung durch, auf welche die Zeit gh verwendet wird. Zwischen O und h liegen also die drei Zeiten: Of zum Anspannen von o bis s, fg zum Gespanntbleiben und gh zum Entlasten von s auf o. *Diese Wechsel absorbiren das Arbeitsvermögen des Materials ganz ebenso, wie wenn die Achse in Bewegung wäre.*

Solche Wechsel kommen bei allen Konstruktionstheilen vor, welche im Zustande der Ruhe belastet sind. Man hat sie bis jetzt gar nicht beachtet. Es wird aber später gezeigt werden, dass sie in gewissen Fällen von grossem Einfluss sein können.

c) Zusammengesetzte Spannungswechsel. Diese können in einfache Wechsel zerlegt werden. Ein Diagramm zu einem zusammengesetzten Wechsel zeigt Fig. 6. Die Spannung geht längs Ok von Null bis s, hält hier eine zeitlang an oder geht sofort, wie in der Figur angenommen, längs kl zurück auf s', wo s' grösser als Null vorausgesetzt wird. Von hier kann s' anhalten längs lm und dann auf Null zurückgehen längs mn, oder es kann bei l die Spannung s' wieder steigen etc. In der Figur wiederholt sich die Dreiecksfläche ikl eine beliebige Anzahl mal. Die Gesammtfläche zerfällt nun in zwei Abtheilungen: die eine ist gebildet von der Fläche $Oimn$, welche einen einfachen Wechsel der zweiten Art darstellt und in kongruente Dreiecke, welche als einfache Spannungswechsel der ersten Art aufgefasst werden können. Man muss sich dabei denken, das Material sei andauernd mit der Kraft s' gespannt und in diesem Zustand, der z. B. durch das Eigengewicht der Konstruktion wie bei einer Brücke eintreten kann, mache nun der Konstruktionstheil die einfachen Wechsel ikl, . . . durch. Nähert sich s mehr und mehr

Fig. 6.



dem Werthe s', so tritt der Einfluss der Wechsel $i\,k\,l$ mehr und mehr zurück und verschwindet ganz im Augenblick, da $s = s'$ wird. Alsdann besteht nur noch der Wechsel $O\,i\,m\,n$.

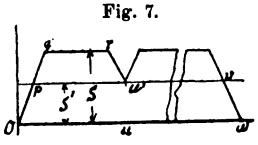
Wöhler hat solche Versuche gemacht, bei welchen „Stäbe innerhalb fest bestimmter Grenzen (s' und s und umgekehrt) kontinuirlich gedehnt wurden", ebenso solche, wo das Nämliche durch Biegung erreicht wurde.

Hieher gehört eine Torsionswelle, welche belastet ist. Arbeitet diese, so stellt s' die grösste Torsionsspannung dar, die sich in der Richtung der Drehung andauernd als Schnittfestigkeit geltend macht. Dann kommt noch die Längenspannung vor, die auf der konvexen Seite als Zug, auf der konkaven als Druck wirkt. Die Resultante aus der Torsions- und der Längenspannung gibt den Betrag s. Zwischen diesen Werthen s' und s schwankt nun die Spannung des Materials bei jeder Umdrehung zweimal.

Man kann auch hieher rechnen die Federn, welche während des Betriebes die Ventile einer Pumpe, die Ventile einer Sulzer'schen Dampfmaschine zudrücken; ferner die Feder einer Uhr, welche in gleichen Zeiten aufgezogen wird. Hier bezeichnet dann $O\,n$ die Zeit, welche verfliesst vom Einsetzen der Feder bis zum Herausnehmen derselben, während $i\,l$ die Zeit ist von einem Aufziehen zum andern. Begreiflich ist dann das Dreieck $i\,k\,l$ nicht gleichschenklig, da die Zeit zum Aufziehen kurz, die zum Ablaufen lang ist.

Fig. 7 ist das Diagramm für einen eingemauerten Dampfkessel, dessen Spannung Nachts nur mässig sinkt. Es bezeichnet $O\,p\,q$ das Ansteigen der Spannung von o bis auf den Betrag s, während des Anheizens am Montag früh, da wir voraussetzen wollen, dass über Sonntag eine vollständige Abkühlung des Kessels eintrete; ferner $q\,r$ die Linie des Gespanntseins während des Betriebes und $r\,u'$ die des Rückganges der Spannung auf einen Betrag $u\,u' = s'$. Von u an werde wieder angeheizt und es wiederholen sich im Laufe der Woche sechs Wechsel, wie sie die Fläche $p\,q\,r\,u'$ darstellt. Am Samstag Abend sinke die Spannung längs $v\,w$ auf Null, wie dies in O der Fall war. Zu den genannten sechs Wechseln kommt nun noch der Wechsel mit der Fläche $o\,p\,v\,w$ hinzu. Alle sieben Wechsel sind einfache der zweiten Art.

Fig. 7.



Aehnlich kann mit andern zusammengesetzten Diagrammen verfahren werden.

7. Berechnung des Arbeitsvermögens der Materialien.

Man nennt Arbeit das Produkt aus Kraft und dem von ihr durchlaufenen Weg, wenn die Richtungen der Kraft und des Weges zusammenfallen.

Wird nun ein Stab in seiner Längenrichtung verstreckt, wie dies in Fig. 1 vorausgesetzt worden, so fallen die Kraft- und Wegrichtung zusammen. Es entsteht also Arbeit. Es schreite z. B. der Angriffspunkt der Kraft vor längs des sehr kleinen Weges $c\,d$, so rückt die Ordinate $c\,c'$ vor nach $d\,d'$ und beschreibt eine schmale Fläche, welche als Rechteck betrachtet werden kann mit der Grundlinie $c\,d$ und der Höhe $c\,c'$; der Inhalt des Flächenelementes ist daher $c\,d \times c\,c'$. Dieses Produkt ist also die verrichtete Arbeit. Nun besteht die ganze Diagrammfläche $a\,g\,g'$ aus solchen Flächenelementen, und da jedes dieser Elemente eine Arbeit ist, so wird die Summe der Flächenelemente, d. h. die ganze Fläche die ganze Arbeit angeben, die verrichtet wird, während der Angriffspunkt der Kraft den ganzen Weg $a\,g$ durchläuft.

Man konstruire das Rechteck $a\,g\,g'\,h$, so ist die Diagrammfläche ein gewisser Theil der Rechtecksfläche, z. B. 0,6 bis 0,8 davon. Bezeichnet man mit k das Verhältniss zwischen der Diagramm- und Rechtecksfläche, so wird die Diagrammfläche sein

$$(1) \qquad k \cdot \overline{ag} \cdot \overline{gg'}.$$

Ein schmiedeiserner Stab von 1 cm^2 Querschnitt und 1 m Länge ertrage eine Ausdehnung von 0,12 m bei einer Bruchspannung von 3600 kg, so wird die am Stab verrichtete Arbeit für $k = 0{,}75$ zu

$$0{,}75 \cdot 0{,}12 \cdot 3600 = 324 \text{ Meter-Kilogramm.}$$

Unter dem specifischen Arbeitsvermögen versteht man nun aber die Arbeit, welche die Volumeneinheit, hier 1 cm^3, aushalten kann, bevor das Material bricht. Daher ist im letzten Beispiel das specifische Arbeitsvermögen der fraglichen Eisensorte 324 : 100 = 3,24 mkg. Man nennt diesen Werth auch kurzweg Arbeitsvermögen.

In der folgenden Zusammenstellung sind die Werthe der drei ersten Vertikalreihen Versuchen entnommen, diejenigen der vierten Reihe nach Ansatz (1) berechnet.

Material	Ausdehnung bis zum Bruch per 1 *m* Länge	Bruchspannung per 1 *cm²*	Faktor *K*	Arbeitsvermögen per 1 *cm³* Inhalt
	m	*kg*		*mkg*
Schmiedeisen, kurz . . .	0,024	3600	0,70	0,60
„ mässig dehnbar	0,120	3600	0,75	3,24
„ stark dehnbar	0,250	3600	0,80	7,20
Flusseisen, stark dehnbar .	0,280	3800	0,80	8,51
Eisendraht, ausgeglüht . .	0,250	5000	0,80	10,00
Gussstahl, gehämmert . .	0,006	7000	0,60	0,25
Gussstahlachse von Krupp	0,150	6000	0,70	6,30

Da es sich je nur um das Arbeitsvermögen der Kubikeinheit, hier des Kubik-Centimeters, handelt, so können die vorstehenden Werthe auch annähernd als richtig gelten für Kompression, Biegung, Schubwirkung und Torsion.

Man ersieht, dass das Arbeitsvermögen, einer und derselben Materialgruppe angehörend, sehr verschieden sein kann. Bei Schmiedeisen z. B. steigt es von 0,6 an bis 10, also auf das Siebzehnfache. Zu dieser Verschiedenheit beim Eisen trägt bei: das ursprüngliche Material (Erz), aus welchem das Material erstellt wird, die Art der Bearbeitung und die Dimensionen der erstellten Stücke. Dieses letztere deswegen, weil z. B. zu dünnem Draht, dünnem Blech etc. nur beste Qualität verwendet werden kann und weil die sorgfältige Bearbeitung alle Schäden beseitigt und den Zusammenhang der Theile gleichförmig macht. Bei grossen Querschnitten nimmt die Festigkeit in der Regel von aussen nach innen ab, weil die äussern Theile durch den Hammer oder die Walze sich enger an einander anschliessen als die innern.

Bei obiger Berechnung ist der Einfluss einer wechselnden Temperatur nicht berücksichtigt. Nun steigt aber die Festigkeit z. B. bei Schmiedeisen mit wachsender Temperatur bis zu cirka 180°, etwa im Verhältniss von 100 : 120. Ebenso steigt auch die Dehnbarkeit, in welchem Masse indessen, ist noch nicht genügend ermittelt. Eine Schätzung der Steigerung des Arbeitsvermögens von Schmiedeisen gibt folgende Zusammenstellung:

Temperatur	0	45	90	135	180°
Steigen des Arbeitsvermögens	1	1,07	1,14	1,21	1,28

Hält also ein Dampfkessel seine Spannungswechsel bei einer durchschnittlichen Temperatur von 135° aus, so muss das oben für Schmiedeisen angegebene Arbeitsvermögen mit 1,21 multiplicirt werden.

8. Schwächung des Arbeitsvermögens durch Spannungswechsel.

Der Stab der Fig. 1 habe 1 cm² Querschnitt und eine ursprüngliche Länge L. Dieser Stab werde *innerhalb der Grenze der Elasticität* gespannt mit einer Kraft s, welche eine Längenzunahme $= \Delta L$ bewirke. Nun verhält sich die Ausdehnung ΔL zur Länge L, wie die Spannung s zu einer noch zu bestimmenden Kraft E, welche man *Modul der Elasticität* nennt. Daher die Gleichung

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{s}{E}. \tag{2}$$

Bei dem dritten der oben angegebenen Hodgkinson'schen Experimente vermochte eine Kraft von 562 *kg* dem Stab von 1000 *mm* Länge eine Ausdehnung beizubringen von 0,284 *mm*. Daher erhält man aus (2)

$$E = s\frac{L}{\Delta L} = 562 \cdot \frac{1000}{0{,}284} = 1978800.$$

Der Modul der Elasticität beträgt also für diese Materialsorte 1978800 *kg*.

Man nimmt gewöhnlich an, dieser Modul variire für Schmiedeisen von 1,8 bis 2 Millionen, für Stahl zwischen 2 und 2,4 Millionen Kilogramm.

Durch die dem Stab beigebrachte Ausdehnung entsteht Arbeit. Ihr entspricht als Diagramm, Fig. 1, ein Dreieck von der Grundlinie ΔL und der Höhe s, also einem Inhalt $= 0{,}5\ s \cdot \Delta L$. Im Ansatz (1) wird nämlich hier der Faktor $k = 0{,}5$. Führt man in diese Arbeitsgrösse den Werth von ΔL aus (2) ein, so ist die auf den Stab verwendete Arbeit

$$0{,}5\frac{s^2}{E}L. \tag{3}$$

Setzt man hierin $L = 1$, so stellt der aus (3) hervorgehende Werth

$$0{,}5\frac{s^2}{E} \tag{4}$$

die Arbeit dar, welche die Volumeneinheit aufnimmt.

Hört die Kraft auf, so zieht sich der Stab zusammen. Bei diesem Rückgang verrichten die Molekularkräfte Arbeit, die genau so gross sein müsste, wie die während des Ausdehnens. Allein das Material ist nicht vollkommen elastisch, die Arbeit der Molekularkräfte fällt also kleiner aus als die der Ausdehnung; daher entsteht

ein Arbeitsverlust, der als ein Theil der Grösse (4) angesehen werden kann. Der Ausdruck für diesen Arbeitsverlust ist daher

$$0{,}5\ a\frac{s^2}{E}, \tag{5}$$

worin a einen sehr kleinen Theil der Einheit bezeichnet, der aus der Beobachtung zu ermitteln ist.

Der Ableitung wurde ein einfacher Spannungswechsel erster Art zu Grunde gelegt. Wiederholt sich dieser Spannungswechsel, so wird jedem derselben ein Arbeitsverlust (5) entsprechen. Es ist möglich, dass diese Verluste ungleich sind. Wir nehmen sie aber für gleiche Dauer der Einfachheit wegen als gleich an. Bezeichnet n die Anzahl derselben, so wird der Arbeitsverlust aller Spannungswechsel sein

$$0{,}5\ an\frac{s^2}{E}. \tag{6}$$

Befindet sich der Stab in einer Spannung s' und geht diese über in die grössere s, so nimmt er bei diesem Uebergang nach (4) eine Arbeit auf gleich

$$0{,}5\frac{s^2}{E} - 0{,}5\frac{s'^2}{E} = 0{,}5\frac{s^2 - s'^2}{E}.$$

Geht die Spannung s wieder zurück auf s', so entsteht ein Arbeitsverlust, der erhalten wird, wenn man den letzten Werth mit a multiplicirt. Daher der Arbeitsverlust für n gleiche Wechsel von gleicher Dauer

$$0{,}5\ a\ n\frac{s^2 - s'^2}{E}. \tag{7}$$

Dieser Ansatz geht sofort in (6) über, wenn $s' = 0$ gesetzt wird.

Bei Ableitung von (6) und (7) ist der *Einfluss der Zeit* nicht berücksichtigt; es wurde stillschweigend vorausgesetzt, jeder Spannungswechsel dauere gerade eine Zeiteinheit.

Die Bedeutung der Konstanten a ergibt sich wie folgt. Man gebe dem Ausdruck (5) die Form

$$\left(0{,}5\frac{s}{E}a\right)\cdot s,$$

so ist bei einem und demselben Wechsel die Spannung eine gegebene Kraft, also das Kräfteverhältniss $s : E$ eine unbenannte Zahl. Wenn z. B. $s = 1000\ kg$, $E = 2\,000\,000\ kg$, so wird dieses Verhältniss

$= 0{,}0005$; folglich der Klammerfaktor $= 0{,}00025\,a$. Das Produkt aber aus diesem Faktor und dem zweiten Faktor s ist Arbeit, also Kraft mal Weg und kann nach Fig. 1 als ein Flächenelement angesehen werden, dessen Grundlinie $0{,}00025\,a$ und dessen Höhe s ist. Folglich bedeutet a eine Linie.

9. Die Zeitfunktion.

Man denke sich mit drei gleichen Stäben von demselben Material einfache Spannungswechsel durchgeführt mit Spannungen von 0 bis s und zurück nach 0; der eine Wechsel dauere 1 Sekunde, der zweite 1 Monat, der dritte 10 Jahre, so sollte nach dem Vorstehenden in allen Fällen ein gleich grosser Arbeitsverlust entstehen. Dem ist aber nicht so: der zweite Arbeitsverlust ist grösser als der erste, der dritte grösser als der zweite. Da nun aber in (6) und (7) die Grössen a und s konstant sind, so muss mittelst eines Faktors korrigirt werden, der von der Zeit abhängt.

Es sei t die Dauer eines Spannungswechsels und $f(t)$ der erwähnte Faktor, so geht der Arbeitsverlust (7), der nunmehr mit A bezeichnet werde, über in

$$A = 0{,}5\,an\,\frac{s^2 - s'^2}{E}\,f(t). \tag{8}$$

Die Grösse $f(t)$ ist die *Zeitfunktion*. Diese muss folgende Bedingungen erfüllen:

1. Es muss für $t = 0$ auch $f(t) = 0$ werden; denn in Gleichung (8) wird jedenfalls die Arbeit $A = 0$ für einen Wechsel, der keine Dauer hat.

2. Es muss für kleine Zeiten $f(t)$ zu t werden und

3. Es muss die Funktion mit der Zeit wachsen, jedoch nicht so rasch wie die Zeit.

Die *erste* Bedingung ist an sich klar. Doch muss beigefügt werden, dass die Zeit nicht unter einen gewissen Werth sinken kann. Ist nämlich der Stab gespannt, z. B. von s' auf s, so braucht es Zeit zur Entlastung auf s'. Kann diese nicht vollständig vor sich gehen, bevor der nächste Wechsel beginnt, so ist das Material noch über s' hinaus gespannt. Zu dieser Spannung kommt nun noch die neue, so dass eine Summe aus zwei Spannungen entsteht, die sich zu einer Summe aus 3, 4 etc. Spannungen ausdehnt, so dass die Stange bald brechen muss. Die Entlastung muss also in obigem Sinne eine vollständige sein, bevor der neue Wechsel beginnt.

Betreffend die *zweite* Bedingung, so machen wir die Voraussetzung, es sei die abnützende Wirkung für kleine Zeiten proportional diesen Zeiten. Lassen wir also zwei gleiche Stäbe einfache Spannungswechsel erster Art durchmachen mit gleicher maximaler Spannung, geben dem einen 1, dem andern 2 Sekunden Zeit zum Wechsel, so können beide eine gleich lange Zeit aushalten, bis ihr Arbeitsvermögen erschöpft ist. Der eine wird zwei mal mehr Wechsel durchmachen, als der andere, allein seine Wechsel absorbiren zwei mal weniger Arbeitsvermögen; also werden sie ein gleich hohes Alter erreichen. Würde aber der zweite Stab z. B. 60 Sekunden zu einem Wechsel gebrauchen, so gälte das Gesagte nicht mehr; die Abnützung während der 60fachen Zeit wäre nicht das 60fache derjenigen des ersten Stabes, sondern weniger.

Das zeigt sich, um die *dritte* Bedingung begreiflich zu machen, wenn man die Wirkung von Wechseln mit einander vergleicht mit Zeiten, deren Werthe weit auseinander liegen. Lässt man z. B. den zweiten Stab des obigen Beispieles 10 Jahre andauernd gleich stark gespannt, so bildet sich unter den Molekularkräften, im Laufe der auf einander folgenden Tage, ein Gleichgewicht aus, an das sich die Moleküle „gewöhnen". Zu dieser Angewöhnung tragen aber die ersten Tage mehr bei, als die spätern. Ja man kann wohl annehmen, dass der Einfluss der letztern Tage ganz zurücktritt gegen denjenigen der ersten Tage.

Man stelle den Zusammenhang zwischen t und $f(t)$ graphisch dar, indem man die Zeit t als Abscisse und $f(t)$ als Ordinate verwendet, so entsteht eine Kurve, die durch den Anfangspunkt der Achsen geht und von da aus eine kurze Strecke einen Winkel von 45° mit der Abscissenachse bildet. Nach und nach nimmt jedoch dieser Winkel ab und wird für grosse Zeiten verschwindend klein.

Der Lauf dieser Kurve ist nicht bekannt, daher auch die Form der Zeitfunktion nicht. Den aufgestellten Bedingungen entsprechen nun verschiedene Funktionen. Wir nehmen an, es sei die Zeitfunktion

$$f(t) = logn\ (1 + t), \tag{9}$$

d. h. gleich dem natürlichen Logarithmus der Summe $1 + t$, so entspricht in der That diese Funktion den gestellten Anforderungen. Es lässt sich bekanntlich $log\ n\ (1 + t)$ in folgende Reihe entwickeln:

$$logn\ (1 + t) = t - \frac{t^2}{2} + \frac{t^3}{3} - \frac{t^4}{4} + \ldots \tag{10}$$

Setzt man hierin $t = 0$, so verschwindet die rechte Seite, aber ebenso die linke, weil $logn\ 1 = 0$ wird, womit die erste Bedingung erfüllt ist.

Nimmt man t sehr klein an, so verschwinden in der Reihe rechts die Glieder vom zweiten an gegenüber dem ersten Glied, also wird dann $logn\ (1 + t) = t$, womit auch die zweite Bedingung erfüllt wird.

Lässt man nun aber t wachsen, so nimmt $logn\ (1 + t)$ nur langsam zu, wie es nach der dritten Bedingung sein soll.

Als Zeiteinheit kann man annehmen die Sekunde, die Minute, die Stunde etc. Wir nehmen als solche die Stunde an. Für 1 Sekunde ist daher

$$t = \frac{1}{3600} = 0{,}000277\ldots \text{ Stunden.}$$

Für diesen Werth von t ist daher das zweite Glied der Reihe in (10) 7200 mal kleiner, als das erste Glied, kann also wie die folgenden gegen das erste Glied vernachlässigt werden.

Die Gleichung (8) geht daher für Zeiten, die erheblich unter 1 Minute liegen, über in

$$A = c\, n \frac{s^2 - s'^2}{E} \cdot t, \tag{11}$$

wo $0{,}5\ a = c$ gesetzt ist. Diese Gleichung bildet die erste Hauptgleichung.

Den natürlichen Logarithmus einer Zahl kann man in den Brigg'schen derselben Zahl umwandeln, wenn man den natürlichen mit 2,302585.. dividirt. Nimmt man für diese Zahl 2,3026, so wird

$$logn\ (1 + t) = 2{,}3026\ log\ (1 + t),$$

worin log den Brigg'schen Logarithmus bezeichnen soll. Dadurch geht, da immer mit Brigg'schen Logarithmen gerechnet wird, Gleichung (8) über in

$$A = c'\, n \frac{s^2 - s'^2}{E}\ log\ (1 + t), \tag{12}$$

worin die Konstante $0{,}5\ a \cdot 2{,}3026$ mit c' bezeichnet ist. Diese Gleichung mag zweite Hauptgleichung genannt werden.

Man erkennt aus den Hauptgleichungen, dass die Anzahl der Spannungswechsel, welche das Material bis zum Bruche aushalten kann, abhängt vom Elasticitätsmodul E, dem Arbeitsvermögen A, den Spannungen s, s' und der Zeit t eines Spannungswechsels.

Der Elasticitätsmodul schwankt für dieselbe Materialsorte nur wenig und kann als konstant angesehen werden; mehr ändert sich das Arbeitsvermögen, besonders wegen der grössern oder geringern Dehnungsfähigkeit. Noch grösser ist der Einfluss der maximalen Spannung, weil diese in der zweiten Potenz in der Gleichung erscheint; am auffallendsten ist der Einfluss der Zeit, der bis jetzt noch gar nicht berücksichtigt worden. Die folgenden Anwendungen werden indessen zeigen, dass für das vorliegende Problem die Dauer der Spannungswechsel nicht mehr unberücksichtigt gelassen werden darf.

10. Bestimmung der Konstanten der Hauptgleichungen.

Wöhler machte Dauerversuche mit Stäben von Eisen und Stahl. Diese Stäbe waren aus je einer Lokomotivachse kalt ausgeschnitten und gegen die Enden hin mit schlanken Hohlkehlen abgesetzt. Sie wurden in der Festigkeitsmaschine verbogen und dabei kontinuirlich gedreht, so dass eine Längenschicht an der Oberfläche bei jeder Umdrehung abwechselnd auf Zug und Druck von gleicher Intensität in Anspruch genommen wurde; es entstanden also bei jeder Umdrehung zwei Spannungswechsel von 0 auf $+ s$ und von 0 auf $- s$. Wie gross die Zeit zu einer Umdrehung war, ist nicht angegeben. Wir werden indessen nicht viel fehlen, wenn wir die Anzahl Touren zu 66 pro Minute annehmen. Daher die Zeit zu einer Drehung $60 : 66 = 0{,}9$ Sekunden, also zu einem Wechsel $= 0{,}45$; mithin in Stunden

$$t = 0{,}45 : 3600.$$

a) Lokomotivachse von Schmiedeisen. Die maximale Spannung betrug $s = 1316\ kg$; der Elasticitätsmodul $E = 1\,800\,000\ kg$, das Arbeitsvermögen $A = 5{,}6$. Der Stab brach, nachdem er 19,2 Millionen Spannungswechsel ausgehalten hatte; daher $n = 38\,400\,000$.

Setzt man diese Werthe in die erste Hauptgleichung (11), so folgt

$$5{,}6 = c \cdot 38\,400\,000 \cdot \frac{1316 \cdot 1316}{1\,800\,000} \cdot \frac{0{,}45}{3600}, \text{ woraus } c = 0{,}00121.$$

Aus anderweitigen Beobachtungen geht hervor, dass das Stäbchen, bei guter Qualität, etwas mehr Wechsel hätte aushalten sollen. Nehmen wir diese Zahl zu 50 Millionen an, so wird

$$c = 0{,}00121 \cdot \frac{38{,}2}{50} = 0{,}000924.$$

Die zweite Hauptgleichung (12) enthält die Konstante $c \cdot 2{,}3026$. Daher wird $c' = 0{,}000924 \cdot 2{,}3026 = 0{,}00213$.

b) Lokomotivachse von Gussstahl. Wir benützen zwei Versuche, eingetragen in der Wöhler'schen Tabelle III *a*. Beide Stäbchen hatten dieselbe maximale Spannung von 2193 *kg*. Der eine brach nach 4 163 375, der andere nach 45 050 640 Umdrehungen. Der eine war also von geringer, der andere von vorzüglicher Qualität. Für normalen Gussstahl nehmen wir das Mittel mit 24 600 000 Umdrehungen, also doppelt so viele Spannungswechsel an. Da $E = 2\,160\,000$ *kg* und $A = 7{,}5$, so gibt Gleichung (11)

$$7{,}5 = c \cdot 2 \cdot 24\,600\,000 \cdot \frac{2193 \cdot 2193}{2\,160\,000} \cdot \frac{0{,}45}{3600}; \quad c = 0{,}00055$$

und daher die Konstante $c' = 0{,}00055 \cdot 2{,}3026 = 0{,}001266$.

In übersichtlicher Zusammenstellung ergiebt sich also

Konstante	c	c'
Schmiedeisen . . .	0,000924	0,00213
Gussstahl	0,00055	0,00127

Nach dieser Vorbereitung soll nun zu Anwendungen übergegangen werden.

I. Aufgaben über einfache Spannungswechsel.

II. Dauer eines Kurbelzapfens.

Der Kurbelzapfen einer Dampfmaschine erhalte von der Schubstange aus einen Druck, der eine grösste Spannung von 350 *kg* bewirke; die Maschine mache in der Sekunde eine Umdrehung; das Arbeitsvermögen des vorzüglichen Schmiedeisens sei 5 *mkg*. Man soll bestimmen, wie lange der Zapfen arbeiten kann, bis er bricht.

Sowohl beim Hin- als Hergang des Dampfkolbens wird der Zapfen gebogen. Dadurch entsteht am Kopf des Zapfens ein Druck auf der konkaven, ein Zug auf der konvexen Seite, beide mit dem maximalen Werth $s = 350$ *kg*. Beim Uebergang aus Druck in Zug und umgekehrt entsteht eine neutrale Stelle; daher wird $s' = 0$. Da $A = 5$, $E = 1\,800\,000$ *kg* und $t = 0{,}5 : 3600$ (nämlich die halbe Sekunde in Stunden angegeben), so gibt Gl. (11)

$$5 = 0{,}000924\ n \cdot \frac{350 \cdot 350}{1\,800\,000} \cdot \frac{0{,}5}{3600},$$

woraus folgt $n = 572\,500\,000$. Daher macht die Maschine 286 250 000 Umdrehungen, bis der Zapfen bricht.

Die Maschine arbeite im Jahr 300 Tage zu 11 Stunden gerechnet, so beträgt die Dauer des Zapfens

$$\frac{286\,250\,000}{300 \cdot 11 \cdot 60 \cdot 60} = 24{,}1 \text{ Jahre.}$$

12. Dauer einer schmiedeisernen Welle.

Die Welle werde verdreht mit einer grössten Spannung an der Oberfläche von 300 *kg*. Sie arbeite je Vormittags und Nachmittags $5\frac{1}{2}$ Stunden gleichförmig, während sie über Mittag und Nacht gänzlich entlastet sei. Wie lange hält sie diese Arbeit aus?

Die Welle macht täglich zwei Spannungswechsel durch. Bei Beginn eines halben Tages steigt die Spannung von Null auf 300 *kg*, dann hält diese Spannung in gleicher Stärke während $5\frac{1}{2}$ Stunden an und sinkt am Ende dieser Zeit auf Null. Das Arbeitsvermögen sei $A = 3$ und $E = 1\,800\,000$; ferner ist $s = 300$ und $t = 5{,}5$ Stunden; daher $log\ (1 + t) = log\ 6{,}5 = 0{,}8129$; folglich nach Gleichung (12)

$$3 = 0{,}00213\ n \cdot \frac{300 \cdot 300}{1\,800\,000} \cdot 0{,}8129;\ n = 34\,650.$$

Arbeitet die Welle im Jahr 300 Tage, so macht sie in dieser Zeit 600 Spannungswechsel durch; daher Dauer der Welle

$$34\,650 : 600 = 57{,}7 \text{ Jahre.}$$

13. Dauer der cylindrischen Wand eines Dampfschiffkessels.

Der Kessel habe die gewöhnliche Form eines liegenden Cylinders mit geringer Länge, grossem Durchmesser, flachen Böden und innerer Feuerung. Er bedürfe 1 Stunde Zeit zum Anheizen, sei dann während 14 Stunden des Betriebes in derselben Spannung und erkalte nachher innert 5 Stunden auf die ursprüngliche Temperatur, so macht er täglich während 20 Stunden einen Spannungswechsel durch. Die maximale Spannung der cylindrischen Wand sei 350 *kg*, ihr Arbeitsvermögen 5 *mkg*. Zu bestimmen, wie lange diese Wand die fragliche Arbeit aushält.

Setzt man $s = 350$, $A = 5$, $E = 1\,800\,000$ und $t = 20$ in Gl. (12), so findet man, da $log\ (1 + t) = log\ 21 = 1{,}32222$:

$$n = 26\,087.$$

Also könnte die cylindrische Wand ein Alter annehmen von 26 087 Tagen, oder, wenn das Jahr zu 300 Arbeitstagen gerechnet wird, von

$$26\,087 : 300 = 87 \text{ Jahren.}$$

Andere Theile des Kessels, wie z. B. die Böden, haben keine stabile Form; sie weichen dem Drucke theilweise aus, um wieder in die frühere Form zurückzukehren, wenn der Druck nachlässt; sie machen also noch Spannungswechsel anderer Art durch, welche ihnen ein früheres Alter bereiten. Ebenso wird das Arbeitsvermögen der Theile, welche einer hohen Temperatur ausgesetzt sind, früher erschöpft. Erfahrungsgemäss werden diese Theile schon nach 20—25 Jahren beseitigt.

14. Dauer der schmiedeisernen Stangen einer hydraulischen Presse.

Diese Presse werde in einer Papierfabrik zur Fabrikation von Handpapier etc. verwendet. Sie mache im Tag zu 10 Stunden je 30 Pressungen, so dass zu einer Operation 20 Minuten entfallen. Davon sollen 4 Minuten auf das Pressen und 16 auf das Zulegen verwendet werden. Das Arbeitsvermögen des Eisens sei 4 *mkg*, die höchste Spannung 800 *kg*; wie viele Pressungen können die Stangen aushalten, bis sie brechen?

Hier ist $A = 4$; $E = 1\,800\,000$; $s = 800$ und $s' = 0$, da die Stangen in der Zwischenzeit vollständig entlastet sind; endlich ist die Zeit zu einem Spannungswechsel $t = 4 : 60 = 0{,}0667$; folglich $log\ (1 + t) = 0{,}02804$. Daher erhält man nach Gl. (12)

$$4 = 0{,}00213\ n \cdot \frac{800 \cdot 800}{1\,800\,000} \cdot 0{,}02804;\quad n = 188\,330.$$

Da 30 Wechsel im Tag vorausgesetzt werden, so beträgt die Dauer der fraglichen Stangen, das Jahr zu 300 Tagen gerechnet

$$\frac{188\,330}{30 \cdot 300} = 20{,}9 \text{ Jahre.}$$

Also können diese Stangen nahe 21 Jahre Dienste leisten, bis ihr Arbeitsvermögen erschöpft ist.

Sollte diese Dauer zu klein erscheinen, so reduzire man die specifische Spannung, z. B. von 800 auf 600, indem man den Stangenquerschnitt im gleichen Verhältniss erhöht; ferner wähle man ein Material aus, dessen Arbeitsvermögen grösser ist, z. B. 4,4 statt 4, so steigt die Dauer auf

$$20{,}9 \cdot \frac{8 \cdot 8}{6 \cdot 6} \cdot \frac{4{,}4}{4} = 40{,}8 \text{ Jahre.}$$

Die oben (S. 10) erwähnte hydraulische Presse machte höchstens 5000 Pressungen durch, bis ihre Stangen brachen, also nahe 38 mal weniger als die Presse unseres Beispiels. Wie ist diese auffallende Abweichung zu erklären? Man könnte einfach die Richtigkeit der Angaben bezweifeln. „Denn es liegen keinerlei Angaben darüber vor, wie deren Materialbeschaffenheit ursprünglich war, und ob die Behandlung der beanspruchten Theile im Laufe der Zeit eine angemessene gewesen ist.“ Nun gibt aber Poncelet an, der Sohn des berühmten Mongolfier habe die Daten erhoben und ein Herr Seguin habe bei direkten Versuchen ähnliche Resultate erhalten. Wir wollen nun annehmen, ein Mann wie Poncelet, den man neben Lagrange, Carnot, Monge, Poisson etc. nennt, sei nicht leichthin verfahren. Wir versuchen es, die genannte Abweichung mit Hülfe unseres Gesetzes zu erklären.

Gleichung (12) zeigt, dass die Grössen c', A, s und t in Frage kommen können. Betreffend c', so ist diese oben (S. 23) ermittelt worden; wir geben ihr also keinen andern Werth. Dagegen wird das Arbeitsvermögen A weit kleiner, die Spannung s etwas grösser und die Zeit t erheblich grösser gewesen sein als in unserm Beispiel. Der kleinste Werth des Arbeitsvermögens ist oben $= 0{,}6$ angegeben, derjenige des Stabes, mit dem Hodgkinson seinen Versuch machte, beträgt cirka 0,87. Es mag daher das Arbeitsvermögen der Stangen der Annonay-Presse zwischen diesen beiden Werthen gelegen haben. Möglich, dass die Spannung etwas mehr als 800 *kg* betrug; nehmen wir sie nunmehr zu 880 *kg* an. Endlich denken wir uns einen ganz andern Betrieb mit der Presse in Annonay als mit der obigen und zwar in der Weise, dass die Ladung neben der Presse aufgeführt und nach Fertigstellen derselben unter die Presse geschoben wurde. Zu dieser Schiebarbeit seien je 4 Minuten Zeit verwendet worden. Dafür konnte die Ladung länger im gepressten Zustand verbleiben; nehmen wir an, 20 Minuten lang. Während des Arbeitstages von 12 Stunden konnten daher $12 \cdot 60 : 24 = 30$ Ladungen gepresst werden, was auf 155 Tage 4650 Pressungen ausmacht. Dann nehmen wir noch weiter an, je die letzte von den 30 Pressungen habe die ganze Nacht hindurch, also 12 Stunden lang, angedauert. Es entstanden daher 155 Spannungswechsel von 12 Stunden Dauer und $4650 - 155 = 4495$ Wechsel von 20 Minuten Dauer. Sehen wir nun nach, wie viel vom Arbeitsvermögen der Stangen durch diese beiden Wechselserien verbraucht wurde.

a) Verbrauch A_1 durch 155 Wechsel. Es ist $n = 155$; $s = 880$; $E = 1\,800\,000$ und $t = 12$; folglich $log\,(1 + t) = log\,13 = 1{,}1139$ und nach (12)

$$A_1 = 0{,}00213 \cdot 155 \cdot \frac{880 \cdot 880}{1\,800\,000} \cdot 1{,}1139 = 0{,}1582.$$

b) *Verbrauch A_2 durch 4495 Wechsel.* Es sind s und E wie oben; dagegen $n = 4495$ und $t = 20 : 60 = 0{,}3333$; daher $log\ (1 + t) = 0{,}1249$ und

$$A_2 = 0{,}00213 \cdot 4495 \cdot \frac{880 \cdot 880}{1\,800\,000} \cdot 0{,}1249 = 0{,}5144.$$

Mithin der gesammte Arbeitsverbrauch

$$A_1 + A_2 = 0{,}673.$$

Diese Arbeit liegt zwischen den oben angegebenen Grenzen, jedoch näher der untern als der obern; das Material muss also ein kurzes gewesen sein.

15. Dauer einer Lokomotivachse.

Eine Lokomotivachse wird durch die Last, welche sie zu tragen hat, gebogen. Dadurch wird das Material derselben auf der konvexen Seite verstreckt, auf der konkaven zusammengedrückt. Zug und Druck machen sich als Spannungen geltend sowohl im Zustand der Ruhe wie der Bewegung und erschöpfen nach und nach das Arbeitsvermögen des Materials. Es soll die Dauer der Achse aus Schmiedeisen und Stahl angegeben werden.

Die Berechnung werde zuerst durchgeführt für *Schmiedeisen,* für welches man annehme $E = 1\,800\,000\ kg$ und $A = 5{,}4\ mkg$ und als Spannung im Zustand der Ruhe 250 *kg*. Dann werde vorausgesetzt, der Betrieb wiederhole sich Jahr um Jahr in derselben Weise, so hat man zunächst nur zu bestimmen, wie viel vom Arbeitsvermögen der Achse verbraucht wird in einem Jahr.

a) *Verbrauch während der Bewegung.* Die Lokomotive werde im Jahr 295 Tage benützt, stehe also 70 Tage ausser Dienst. Während der Fahrt steigere sich die Spannung des Achsenmaterials von 250 *kg* auf 450 *kg* wegen der stossenden Wirkungen beim Uebergang über die Schienenstösse, derjenigen des Zuckens, Schlingerns, Nickens, Wankens, Wogens etc. Während des Tages sei die Lokomotive 9 Stunden in Bewegung und mache durchschnittlich $10\,m$ Weg in der Sekunde, so beträgt der täglich durchlaufene Weg

$$10 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 9 = 324\,000\ m.$$

Der Umfang des Rades betrage 4 *m*, so macht die Achse im Tag $324\,000 : 4 = 81\,000$ Umläufe, also 2 mal mehr Spannungs-

wechsel durch. Die Zeit zu einer Umdrehung ist 4 : 10 = 0,4 Sekunden, also zu einem Spannungswechsel 0,2 Sekunden, wodurch man erhält $t = 0{,}2 : 3600$.

Da ferner $s' = 0$; $s = 450$ und Anzahl Spannungswechsel in 1 Jahr $n = 2 \cdot 81\,000 \cdot 295$; so erhält man den Arbeitsverbrauch A_1 pro Jahr nach Gleichung (11)

$$A_1 = 0{,}000924 \cdot 2 \cdot 81\,000 \cdot 295 \cdot \frac{450 \cdot 450}{1\,800\,000} \cdot \frac{0{,}2}{3600} = 0{,}27597.$$

b) *Verbrauch während des Stillstandes.* Wenn die Achse zur Ruhe gelangt, so geht bei der letzten Viertelsdrehung die Spannung durch die Null nach 250 *kg* und verbleibt in diesem Werthe, als Zug wie als Druck, bis die Bewegung beginnt, wobei das Material, das bisher mit 250 *kg* gespannt war, sich entlastet und bei einer Viertelsdrehung ganz entlastet ist. Man hat also anfangs ein Anheben der Spannung von 0 bis 250 und am Ende ein Nachlassen von 250 auf 0. Dieser Wechsel gibt es nun folgende: solche an den Haltstellen von kurzer Dauer, solche von längerer Dauer, solche in der Remise und während der Rasttage.

Wechsel an kurzen Haltstellen. Wir nehmen die Zeit eines solchen Wechsels zu 2 Minuten an und setzen voraus, er wiederhole sich täglich 30 mal, was eine mittlere Strecke zwischen zwei benachbarten Haltstellen von 10 800 *m* ergibt.

Da $s' = 0$; $s = 250$; $n = 30 \cdot 295$ (für 1 Jahr); $t = 2 : 60$; $log\ (1 + t) = 0{,}01423$, so wird der Arbeitsverbrauch A_2 nach (12)

$$A_2 = 0{,}00213 \cdot 30 \cdot 295 \cdot \frac{250 \cdot 250}{1\,800\,000} \cdot 0{,}01423 = 0{,}00931.$$

Wechsel von längerer Dauer. Wir nehmen täglich 4 solcher an von je 1 Stunde Dauer. Da $n = 4 \cdot 295$; s' und s wie oben und $t = 1$; $log\ (1 + t) = 0{,}30103$, so wird dieser Arbeitsverbrauch

$$A_3 = 0{,}00213 \cdot 4 \cdot 295 \cdot \frac{250 \cdot 250}{1\,800\,000} \cdot 0{,}30103 = 0{,}02624.$$

Wechsel in der Remise. Mittlere Dauer derselben 24 — 9 — 1 — 4 = 10 Stunden. Daher $t = 10$; $log\ (1 + t) = 1{,}04139$; ferner pro Jahr $n = 295$; folglich der Arbeitsverbrauch

$$A_4 = 0{,}00213 \cdot 295 \cdot \frac{250 \cdot 250}{1\,800\,000} \cdot 1{,}04139 = 0{,}02170.$$

Wechsel während der Rasttage. Während dieser Zeit mag theilweise das Wasser im Kessel fehlen, weshalb $s = 200$ statt 250 angenommen werde. Da die 70 Tage als unzusammenhängend zu denken sind, so wird $t = 24$; folglich $log\ (1 + t) = 1{,}39794$ und der Arbeitsverbrauch nach (12)

$$A_5 = 0{,}00213 \cdot 70 \cdot \frac{200 \cdot 200}{18000000} \cdot 1{,}39794 = 0{,}00462.$$

Die Summe aus den 4 letzten Resultaten ist = 0,06187.

Dieser Werth muss wie folgt aufgefasst werden. Die Wechsel unter (*a*) vollziehen sich so, dass das Material rings um den Umfang der Achse herum gleichförmig erschöpft wird, während dies mit den Wechseln unter (*b*) nicht vorausgesetzt werden kann. Eine und dieselbe Stelle der Oberfläche der Achse, unmittelbar unter dem Rahmen, kann 10 und 100 mal zu unterst oder zu oberst liegen, also dem höchsten Zug oder Druck ausgesetzt sein, während eine andere, in demselben Querschnitt liegend, nie oder nur wenige Male die höchste Spannung auszuhalten hat. Das obige Resultat ist nun unter der Voraussetzung gewonnen worden, dass immer dieselbe Stelle die höchste Spannung aushalte; die 0,06187 *mkg* Arbeit werden also dem Material einseitig entzogen; die Dauer der Achse wird dadurch zu einem Minimum. Würde sich die höchste Spannung gleichförmig über den Umfang vertheilen, so würden die 0,06187 *mkg* auch gleichförmig dem Material enthoben und die Dauer der Achse würde ein Maximum. Maximum und Minimum verhalten sich wie $\pi^2 : 2^2$ oder wie 1 : 0,405. Wegen der gleichförmigen Vertheilung würde also der Arbeitsverbrauch einer und derselben Stelle im gleichen Verhältniss kleiner, also nicht 0,06187, sondern nur $0{,}405 \cdot 0{,}06187 = 0{,}02505$. Allein weder der eine noch der andere dieser extremen Fälle wird eintreten; deshalb wird man das Mittel aus jenen extremen Werthen in Rechnung bringen. Dieses ist = 0,04346.

Hiernach beträgt der Arbeitsverbrauch per Jahr

Während der Bewegung . .	0,27597 *mkg*.
Während der Ruhe	0,04346 $_n$
Zusammen .	0,31943 *mkg*.

Davon entfallen 0,87 auf die Bewegung und 0,13 auf den Stillstand.

J. Claudel gibt in seinem Aide-Mémoire (1872) an, *Perdonnet* habe angerathen, die Lokomotiven jährlich keine zu grossen Wege durchlaufen zu lassen, um sie nicht zu rasch abzunützen. Nach dem Vorstehenden ist diese Auffassung unrichtig, weil sich der Einfluss der Spannungswechsel während des Stillstandes mit der Zeit steigert.

Die Achse muss nun ausgewechselt werden, bevor ihr ganzes Arbeitsvermögen 5,4 *mkg* erschöpft ist. Soll ihr noch der Sicherheit wegen 0,9 *mkg* verbleiben, so sind 4,5 *mkg* zu verbrauchen. Also wird die Achse im Dienst verwendet werden dürfen

$$4{,}5 : 0{,}31943 = 14{,}1 \text{ Jahre.}$$

Sie kann daher einen Weg durchlaufen = 1 347 678 000 *m* mit einer Anzahl Spannungswechsel der Achse = 673 839 000.

Bei einer Achse von *Krupp'schem Gussstahl* kann angenommen werden: $A = 7{,}5$ und $E = 2\,160\,000$. Die Betriebsweise sei dieselbe, wie die der schmiedeisernen Achse; dagegen sei bei Stahl die grösste Spannung des Materials: im Zustand der Ruhe = 330 *kg* und während der Bewegung 550 *kg*; sodann ersetze man beim letzten Versuch die Spannung 200 durch 270.

Die Konstanten der Hauptgleichungen sind hier $c = 0{,}00055$ $c' = 0{,}00127$. Man findet

Arbeitsverlust während der Bewegung . . .	0,2454 *mkg*
Arbeitsverlust während der Ruhe, im Mittel .	0,0450 „
Gesammter Arbeitsaufwand pro Jahr .	0,2904 *mkg*

Dürfen von den 7,5 *mkg* Arbeitsvermögen der Achse verwendet werden 6,5 *mkg*, bevor die Achse sicherheitshalber ausgewechselt werden muss, so wird die Dienstzeit der Achse

$$6{,}5 : 0{,}2904 = 22{,}4 \text{ Jahre.}$$

Der ganze durchlaufene Weg beträgt daher 214 000 000 *m* und die Anzahl Spannungswechsel der Achse 1 070 000 000.

II. Aufgaben über zusammengesetzte Wechsel.

16. Dauer der Feder einer Taschenuhr.

Nach je 24 Stunden werde die Uhr aufgezogen. Dabei steige die Spannung der Feder von 500 auf 900 *kg* (per 1 cm^2 Federquerschnitt). Hierauf senke sich die Spannung der Feder während 24 Stunden gleichförmig wieder auf 500 *kg*. Dieser Vorgang von gleicher Dauer wiederhole sich, z. B. während 30 Jahren, so bleibt die Feder während der 30 Jahre immer gespannt, wie das die Fläche *Oimn* der Figur 6 zeigt, und zwar mit 500 *kg*, macht also einen Spannungswechsel durch, der längs *Oi* beim Einsetzen der Feder

anhebt und nach 30 Jahren bei mn, beim Wegnehmen oder Brechen derselben schliesst. Daneben macht aber die Feder innert je 24 Stunden einen Spannungswechsel ikl durch, indem die Spannung von 500 auf 900 *kg* steigt und wieder auf 500 *kg* sinkt. Zwar geht das Steigen rasch, das Sinken langsam vor sich; allein wir bringen nicht diese beiden Zeiten, sondern, der Einfachheit wegen, nur ihre Summe, nämlich 24 Stunden, in Rechnung. Die Anzahl dieser Spannungswechsel ist $30 \cdot 365 = 10\,950$.

Wie viel Arbeitsvermögen muss die Feder haben, um diese Wechsel aushalten zu können?

a) Für den einen Wechsel, der 30 Jahre andauert, ist $t = 30 \cdot 365 \cdot 24$ Stunden, also $log\ (1 + t) = 5{,}4196$; ferner steigt die Spannung von 0 auf 500 und sinkt wieder auf 0; daher $s' = 0$ und $s = 500$. Wenn nun noch die Konstante der Gl. (12) $c' = 0{,}0015$ und $E = 2\,200\,000$, so wird der Arbeitsverbrauch A_1 nach (12)

$$A_1 = 0{,}0015 \cdot \frac{500 \cdot 500}{2\,200\,000} \cdot 5{,}4196 = 0{,}00092.$$

b) Für die andern Wechsel ist $n = 10\,950$; $s' = 500$; $s = 900$; $t = 24$ Stunden; daher $log\ (1 + t) = 1{,}39794$; folglich der Arbeitsverbrauch A_2 nach (12)

$$A_2 = 0{,}0015 \cdot 10\,950 \cdot \frac{900^2 - 500^2}{2\,200\,000} \cdot 1{,}39794 = 5{,}84465.$$

Summe beider Arbeiten $A_1 + A_2 = 5{,}8456$.

Wenn die Feder gerade ein Arbeitsvermögen von 5,8456 *mkg* besitzt, so wird sie brechen; ist ihr Arbeitsvermögen dagegen kleiner, so wird sie weniger als 30 Jahre aushalten.

Man erkennt, wie klein der unter (*a*) aufgeführte Arbeitsverlust ist. Er wird deswegen klein, weil er nur von Einem Spannungswechsel herkommt. Das wird sich auch in den folgenden Aufgaben ähnlich ergeben.

17. Dauer der cylindrischen Wand eines eingemauerten Dampfkessels.

Der Kessel sei liegend, seine äussere Mantelfläche werde theilweise von den heissen Gasen bestrichen, daher eine Einmauerung nöthig. Der Betrieb des Kessels sei so eingerichtet, dass sich von Woche zu Woche dieselbe Beanspruchung des Materials wiederhole und zwar in folgender Weise. Von je Vormittags 5 Uhr an werde der Kessel während 1 Stunde angeheizt, bis die äussere cylindrische

Wand eine Spannung von 400 *kg* erreicht habe. Diese Spannung halte nicht nur gleichförmig an während der Tagesarbeit, sondern dehne sich noch, wegen des erhitzten Mauerwerkes, in welches der Kessel eingeschlossen ist, um einige Stunden weiter aus, sinke dann aber bis Vormittags 5 Uhr auf 200 *kg*. Am Sonntag sei der Betrieb eingestellt, diese Spannung sinke daher nach weitern 10 Stunden auf Null. Dadurch entsteht während einer Woche ein zusammengesetzter Spannungswechsel. Der eine Theil-Wechsel beginnt am Montag 5 Uhr Vormittags und hört am Sonntag um 3 Uhr Nachmittags auf, dauert also 6 Tage und 10 Stunden = 154 Stunden. Die andern Wechsel dauern 24 Stunden mit der minimalen Spannung von 200 und der maximalen Spannung von 400 *kg*. Wie viel vom Arbeitsvermögen der cylindrischen Wand wird während einer Woche verbraucht und wie lange hält dieser Kesseltheil bei 5 *mkg* Arbeitsvermögen aus?

a) *Wechsel von 154 Stunden.* Es ist $n = 1$; $s' = 0$; $s = 200$; $E = 1\,800\,000$; $t = 154$; $log\ (1 + t) = 2{,}19033$; daher Arbeitsverbrauch A_1 nach Gleichung (12)

$$A_1 = 0{,}00213 \cdot 1 \cdot \frac{200 \cdot 200}{1\,800\,000} \cdot 2{,}19033 = 0{,}00010\ mkg.$$

b) *Wechsel mit 24 Stunden Dauer.* Es ist $n = 6$; $s' = 200$; $s = 400$; $t = 24$; $log\ (1 + t) = 1{,}39794$; daher Arbeitsverbrauch A_2 nach Gleichung (12)

$$A_2 = 0{,}00213 \cdot 6 \cdot \frac{400^2 - 200^2}{1\,800\,000} \cdot 1{,}39794 = 0{,}00119\ mkg.$$

Summe dieser beiden Arbeiten $A_1 + A_2 = 0{,}00129\ mkg$.

In einer Woche wird also die Arbeit 0,00129 *mkg* verbraucht; daher die Anzahl Wochen bis 5 *mkg* aufgezehrt sind,

$$5 : 0{,}00129 = 3876,$$

was eine Dauer von 3876 : 52 = 74,5 Jahren ausmacht.

Auch hier gilt von jenen Kesseltheilen, welche durch den Dampfdruck Deformationen eingehen oder durch die Einwirkung des Feuers leiden, was oben (S. 24) von Theilen des Schiffskessels gesagt ist.

18. Dauer einer Schwungradachse.

Die liegende Achse erhalte durch das Gewicht des Schwungrades eine Biegungsspannung von 200 *kg* und durch den Antrieb

eines Motors eine Torsionsspannung von 220 *kg*. Die Achse mache 1 Umdrehung in 1 Sekunde und sei je Vor- und Nachmittags $5^1/_2$ Stunden im Betrieb. Wie lange wird sie aushalten, wenn ihr Arbeitsvermögen 4,5 *mkg* beträgt?

Zunächst mag berechnet werden, wie viel vom Arbeitsvermögen der Achse in 1 Jahr verbraucht wird.

Es entstehen Spannungswechsel während der Bewegung und während der Ruhe. Die Wechsel während der Bewegung sind zusammengesetzte, die während des Stillstandes einfache.

a) *Wechsel während der Bewegung.* Die Torsionsspannung beginnt zu Anfang eines halben Tages, hält dann den halben Tag hindurch konstant an und lässt am Schluss desselben nach. Es entstehen also täglich 2 solcher Wechsel $Oimn$, Fig. 6, für welche man hat: $s' = 0$; $s = 220$; $E = 1\,800\,000$; $t = 5{,}5$ Stunden; *log* $(1 + t) = 0{,}8129$ und für 1 Jahr zu 300 Tagen $n = 2 \cdot 300$. Hiefür Arbeitsverlust nach Gleichung (12)

$$0{,}00213 \cdot 600 \cdot \frac{220 \cdot 220}{1\,800\,000} \cdot 0{,}8129 = 0{,}02793.$$

Ausser der Torsionsspannung (in der Querrichtung) macht sich aber auch die Biegungsspannung (in der Längenrichtung) geltend. Beide stehen rechtwinklig zu einander, so dass aus ihnen eine Resultante $\sqrt{200^2 + 220^2} = 300$ *kg*. entsteht. Bei jeder Umdrehung macht nun die Achse 2 Spannungswechsel durch, indem die Spannung 220 zweimal übergeht in 300 und wieder zurück auf 220. Solcher Wechsel gibt es also in 1 Tag $2 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 11 = 79\,200$ und für 1 Jahr 300 mal mehr.

Da $= s' = 220$; $s = 300$ und $t = 0{,}5 : 3600$; so wird der Arbeitsverlust für 1 Jahr nach (11)

$$0{,}000924 \cdot 300 \cdot 79200 \cdot \frac{300^2 - 220^2}{1\,800\,000} \cdot \frac{0{,}5}{3600} = 0{,}07047.$$

b) *Wechsel während des Stillstandes.* Solcher Wechsel gibt es über Mittag, über Nacht und während 65 vollen Tagen. Es entstehen deshalb Spannungswechsel, weil die Achse im Ruhezustand durch das Schwungrad gebogen ist. Allein das genügt nicht, es muss ein Anspannen, Gespanntsein und Nachlassen vorhanden sein. Und in der That hört beim Abstellen die Torsion auf und die Biegungsspannung besteht für sich allein, jedoch so, dass bei der letzten Viertelsdrehung die Spannung durch Null nach $\pm$ 200 übergeht und dann darin verharrt, bis die Bewegung wieder beginnt,

wobei während der ersten Viertelsdrehung jene $\pm$ 200 in Null übergehen. Für alle drei Wechsel ist $s' = 0$, $s = 200$, während n und t verschieden sind.

Wechsel über Mittag. Für 1 Jahr $n = 300$; für die Mittagsrast $t = 1$ Stunden; $log\ (1 + t) = 0{,}30103$; daher

Arbeitsverlust = 0,00427.

Wechsel über Nacht. $n = 300$; $t = 12$; $log\ (1 + t) = 1{,}11394$.

Arbeitsverlust = 0,01582.

Wechsel während 65 Tagen. $t = 24$; $log\,(1 + t) = 1{,}39794$.

Arbeitsverlust = 0,00430.

Gesammter Arbeitsverlust während der Ruhe = 0,02439.

Dieser ist als ein maximaler aufzufassen (s. Lokomotivachse pag. 29); der minimale ist nur 0,405 von jenem, also = 0,00988 und das Mittel aus beiden extremen Werthen = 0,01713. Daher ergibt sich

Arbeitsverbrauch während der Bewegung	= 0,09839.
Arbeitsverbrauch während der Ruhe . .	= 0,01713.
Summe pro 1 Jahr	= 0,11552.

Wenn nun das Arbeitsvermögen, wie oben angegeben, 4,5 *mkg* beträgt, so erhält die Achse eine Dauer von

4,5 : 0,11552 = 39 Jahren.

19. Schwächung des Materials in der Krümmung einer gebogenen Schiene.

Es stelle Fig. 8 eine solche Schiene dar. Die Radien $a\,m$ und $b\,m$ schliessen die Biegung ein und es sei Bogen $a\,b$ die neutrale Schicht und Bogen $c\,d$ die innerste Schicht auf der konkaven Seite. Die Schiene verlängere sich geradlinig in der Richtung $a\,a'$ und $b\,f$.

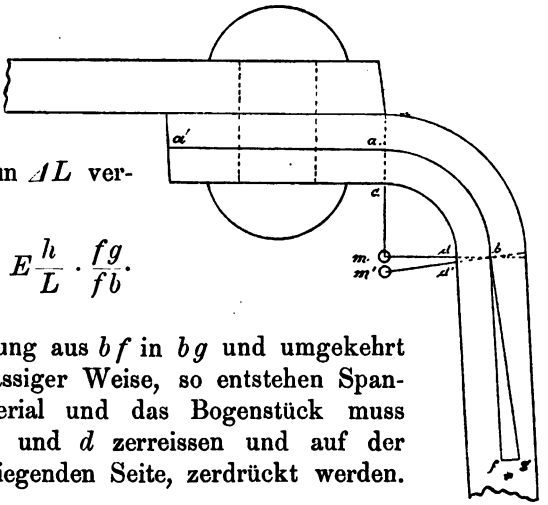
Nun werde auf einmal der Winkel dieser zwei Geraden etwas vergrössert, indem $b\,f$ in $b\,g$ und Radius $b\,m$ in $b\,m'$ übergehe. Dadurch entstehen zwei ähnliche Dreiecke $b\,d\,d'$ und $b\,f\,g$. Es sei Bogen $c\,d = L$, die Zunahme desselben $d\,d' = \Delta L$ und die halbe Schienendicke $d\,b = h$, so ist

$$\Delta L = h \cdot \frac{f\,g}{f\,b};$$

daher auch

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{h}{L} \cdot \frac{f\,g}{f\,b}.$$

Allein dieser Werth ist nach Gl. (1) $= \frac{s}{E}$, wenn mit s die spec. Spannung bezeichnet wird, welche die Länge L um ΔL vergrössert; daher



$$(13) \qquad s = E\frac{h}{L} \cdot \frac{fg}{fb}.$$

Nun erfolge die Bewegung aus bf in bg und umgekehrt in stetiger und regelmässiger Weise, so entstehen Spannungswechsel im Material und das Bogenstück muss schliesslich zwischen c und d zerreissen und auf der konvexen, gegenüber liegenden Seite, zerdrückt werden.

20. Anwendung auf den Boden eines Dampfkessels.

Es sind uns folgende Angaben über einen neuen Dampfkessel gemacht worden. Der innere Durchmesser des cylindrischen Kessels ist 110 *cm;* die Böden sind kugelförmig abgebogen mit einem Wölbungsradius von 140 *cm,* sodann gegen den Umfang hin umgebordet, mit einem innern Radius von 5 *cm* und schliesslich mit ihrem cylindrischen Theil in die cylindrische Wand des Kessels eingeschoben und mit ihr vernietet. Die Wanddicke des Bodens ist 15 *mm,* die Bogenlänge cd, Fig. 8, 62 *mm.*

Der Kessel soll mit 11 Atmosphären Dampfdruck arbeiten. Er wurde nun einer Kaltwasser-Druckprobe unterworfen. Dabei galt es besonders, die Ausweichung des Bodens in der Mitte zu konstatiren. Bei 16 Atm. Druck stellte sich in der That eine solche Ausweichung in der Richtung der Kesselachse ein von 2 *mm.* Es macht dies für 11 Atm. 1,375 *mm* aus. Nun ist die Länge der Tangente bf obiger Figur bis zur geometrischen Achse des Kessels $= 55$ *cm* und die Ausweichung längs des Bogens fg, beschrieben von b aus, $= 0{,}9 \,.\, 1{,}375 = 1{,}2375$ *mm.* Aus diesen Daten ergeben sich folgende Resultate:

Spannung des kugelförmig gewölbten Bodens bei 11 Atm. $= 256$ *kg.*
Spannung des Bogens längs aa' des Bodens . . . . $= 200$ „

Beide Spannungen gehen längs des Bogens ab in einander über.

Spannung nach Gl. (13) $s = 1\,800\,000 \cdot \frac{7{,}5}{62} \cdot \frac{1{,}2375}{550} = 490\ kg.$

Spannung im Boden an der Stelle d $256 + 490 = 746$ „

Nun sei der Betrieb des Kessels derselbe wie in § 17; es wiederholen sich also die Spannungswechsel wie folgt. Am Montag früh 5 Uhr beginne das Anheizen, dann bleibe den Tag über der Kessel mit 11 Atm. gespannt, diese Spannung sinke indessen während der Nacht auf den halben Druck u. s. w. Nur am Sonntag sinke er je von 5 Uhr des Morgens bis Nachmittags 3 Uhr auf Null. Dadurch entsteht ein Wechsel, der mit der Spannung 0 anhebt, während 6 Tagen auf $746 : 2 = 373$ *kg* verharrt und nach weitern 10 Stunden auf 0 zurückgeht. Die Dauer dieses Wechsels ist also 154 Stunden. Ausser diesem entstehen noch 6 andere Wechsel mit Ansteigen von 373 auf 746 und Zurückgehen auf 373 innert 24 Stunden. Daher der Arbeitsverbrauch

a) *für den wöchentlichen Spannungswechsel*

$$0{,}00213 \cdot \frac{373 \cdot 373}{1\,800\,000} \cdot 2{,}1875 = 0{,}00036\ mkg.$$

b) *für die 6 täglichen Wechsel*

$$0{,}00213 \cdot 6 \cdot \frac{746^2 - 373^2}{1\,800\,000} \cdot 1{,}3979 = 0{,}00414 \quad „$$

Summe beider Werthe pro 1 Woche $= 0{,}00450$ „

Wenn das Arbeitsvermögen zu 5 angenommen wird, so ist die Dauer des Kessels $5 : 0{,}0045 = 1111$ Wochen, was, ein Jahr zu 50 Wochen gerechnet, ausmacht

$$1111 : 50 = 22{,}2 \text{ Jahre.}$$

Nach 22,2 Jahren muss also dieser Boden sich von der cylindrischen Wand des Kessels ablösen. Durch die steigende Spannung beim Anheizen bildet sich schliesslich auf der innern Seite zwischen c und d, rings um den Boden herum, ein kleiner Riss, der den Tag durch offen bleibt und sich mit Wasser füllt. Bis gegen Morgen schliesst sich der Riss theilweise, um sich dann neuerdings und verstärkt zu öffnen, bis der Bruch erfolgt. Da dem Riss nach das schützende Eisenoxyd fehlt, so bildet sich rasch Rost, der den Bruch etwas beschleunigen mag; doch ist er nur eine begleitende Erscheinung. So geschah es mit dem Boden jenes Dampfsammlers, der 1892 auf dem Schiffe Montblanc in Ouchy (Genfersee) brach und 24 Personen das Leben kostete. Dieser Montblanc-Kessel hatte nur 17 Jahre Dienst gethan.

21. Dauer des Sägeblattes einer Bandsäge.

Bei einer Bandsäge zum Schneiden von Holz sei:
D der Durchmesser der beiden Rollen, über welche das Sägeblatt läuft,
a der Abstand der beiden Rollen-Achsen,
h, b und L Dicke, Breite und Länge des Sägeblattes,
v seine Geschwindigkeit per Sekunde,
N die Anzahl Pferde, welche zum Schneiden nöthig ist, mit Ausschluss der Arbeit für den Leergang der Säge, und
P der Widerstand, welchen das Holz den Zähnen der Säge entgegensetzt,
so ist Pv die Arbeit zum Schneiden; diese ist aber auch in Meterkilogrammen $= 75\,N$; daher zur Berechnung des Widerstandes

$$P = 75\,\frac{N}{v}. \tag{14}$$

Nun muss das Sägeband so angespannt sein, dass es bei Ueberwindung von P auf den Rollen nicht gleitet.

Es sei, Fig. 9, mn das Bandstück, das ab der untern treibenden Rolle abläuft und bei n aufläuft, so wird pq das Stück sein, das den Widerstand P zu überwinden hat und daher eine höhere Spannung haben muss als mn. Nach der Lehre von der Reibung genügt es, damit das Band nicht gleitet, wenn das Stück mn verstreckt ist mit einer Kraft $= P$ und das Stück pq mit der doppelten Kraft $2\,P$.

Es sei nun s' die specifische Spannung des Bandstückes mn, so ist der Widerstand des ganzen Sägeblattes $= bh\,s'$; daher die Spannung

$$s' = \frac{P}{bh} \tag{15}$$

und diejenige des Stückes $pq = 2\,s'$.

Das Stück mn läuft bei n auf die obere Rolle, wodurch es gebogen, also auf der äussern Seite verstreckt, auf der innern verkürzt wird. Ein Stück von der Länge l nehme dadurch eine Verstreckung Δl an, so gilt das Gesetz (2), wonach $\Delta l : l = s : E$. Allein es verhält sich auch $\Delta l : l$, wie die Banddicke h zum Rollendurchmesser. Daraus ergibt sich

Fig. 9.

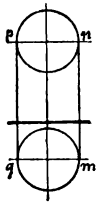
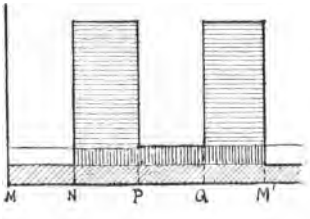


Fig. 10.



$$s = E\,\frac{h}{D}. \tag{16}$$

Daher wird nun die Spannung auf der konvexen Seite des Sägebandes längs des Bogens $np = s + s'$. Beim Uebergang von p in den geradlinigen Theil pq sinkt diese Spannung auf $2s'$, beim Auflaufen in q steigt diese auf $2s' + s$, um beim Ablaufen im m wieder in s' überzugehen.

Es entstehen daher bei jedem Seilumlauf Spannungswechsel, die in Fig. 10 dargestellt sind. Es ist MM' die Zeit zu einem Umlauf; MN die Zeit, bis m nach n kommt; NP für das Durchlaufen des Bogens np, PQ für pq und QM' für qm. Dabei sind MN und PQ gleich gross, ebenso NP und QM'. Die schief schraffirte Fläche zieht sich vom Auflegen des Bandes bis zum Abnehmen desselben hin. Da aber die Spannung, wie wir sehen werden, eine sehr kleine ist und dieser Wechsel nur einmal vorkommt, so fällt er seiner Kleinheit wegen nicht in Betracht.

Dann kommt ein Spannungswechsel vor, der bei jedem Umlauf von N bis M' dauert. Bei diesem steigt die Spannung von s' aut $2s'$ und sinkt wieder auf s'. Dieser wiederholt sich zwar so oft, so viel Bandumläufe vorkommen; allein s' ist, wie schon bemerkt, sehr klein, daher in der Hauptgleichung (11) die Differenz $(2s')^2 - s'^2 = 3s'^2$ klein und es kann auch dieser Wechsel ausser Rechnung fallen.

Es verbleiben daher während der Bewegung nur noch die Wechsel längs der Zeiten NP und QM' mit Spannungen von $2s'$ auf $2s' + s$ und wieder zurück auf $2s'$, was sehr nahe auf das Gleiche herauskommt, wenn man annimmt, es steige die Spannung von 0 auf s und sinke wieder auf 0.

Bezeichnet t die Zeit NP, so erhält man als Arbeitsverbrauch für n Bandumläufe, also für $2n$ Spannungswechsel der letztern Art nach Gl. (11), wenn $s' = 0$ gesetzt wird,

$$A = c \cdot 2n \cdot \frac{s^2}{E} \cdot t. \tag{17}$$

Nun gibt es aber noch Spannungswechsel während des Zustandes der Ruhe. Sowie nämlich abgestellt wird, gleichen sich die Spannungen s' und $2s'$ der beiden geradlinigen Stücke zum mittleren Werthe 1,5 s' aus, während die Biegungsspannung s auf den Rollen fortdauert. Im letzten Augenblick der Bewegung von m nach n geht die Spannung s' auf $s + s'$ und im ersten Augenblick bei Beginn der Bewegung sinkt die Spannung bei p von $s + s'$ auf $2s'$; ebenso steigt bei Beginn der Ruhe in q die Spannung $2s'$ auf $2s' + s$ und diese geht nach Ablauf der Ruhe über in s'. Man kann nun beide Wechsel, wegen der Kleinheit von s', als gleich

ansehen und zwar so, als gehe die Spannung von 0 in s über, halte dann an und gehe wieder in 0 zurück. Solche Wechsel entstehen während der Mittagszeit, der Nachtzeit und während der Rasttage. Ihr Arbeitsverbrauch ergibt sich aus Gl. (12).

Bei einer Bandsäge sei $a = 2\ m;\ D = 1\ m;\ v = 10\ m;$ $h = 0{,}1\ cm;\ b = 6\ cm$ und $N = 1{,}2$ Pferde, so wird nach Gl. (14)

$$P = 75 \cdot \frac{1{,}2}{10} = 9\ kg,$$

und nach Gl. (15) die Längenspannung per 1 cm^2 Querschnitt der Säge

$$s' = \frac{9}{6 \,.\, 0{,}1} = 15\ kg.$$

Ferner nach Gl. (16) die Biegungsspannung, wenn $E = 2\,000\,000\ kg$ angenommen wird,

$$s = 2\,000\,000 \cdot \frac{0{,}1}{100} = 2000\ kg.$$

Man ersieht, dass in der That in diesem Beispiel die Grösse s' nur $^1/_{133}$ von s ist.

a) *Wechsel während der Bewegung.* Es ist

$L = 2a + D\pi = 4 + 3{,}14 = 7{,}14\ m.$

Zeit zu 1 Umlauf . . $L : v = 0{,}714$ Sekunden.

Zeit QM' . . $0{,}714 \cdot \frac{D\pi}{2L} = 0{,}157$ „

Anzahl Umläufe in 1 Std. $\frac{v \,.\, 60 \,.\, 60}{L} = 5042.$

Die Konstante der Gl. (11) sei $c = 0{,}00055$, so erhält man für 1 Tag zu 11 Stunden als Arbeitsverlust

$$A_1 = 0{,}00055 \cdot 11 \cdot 2 \cdot 5042 \cdot \frac{2000 \,.\, 2000}{2\,000\,000} \cdot \frac{0{,}157}{3600} = 0{,}00532.$$

b) *Wechsel über Mittag* zu 1 Stunde. Konstante $c' = 0{,}00127$; folglich

$$A_2 = 0{,}00127 \cdot \frac{2000 \,.\, 2000}{2\,000\,000} \cdot 0{,}30103 = 0{,}00076.$$

c) *Wechsel über Nacht zu 12 Stunden.*

$$A_3 = 0{,}00127 \cdot \frac{2000 \,.\, 2000}{2\,000\,000} \cdot 1{,}1139 = 0{,}00284.$$

d) *Wechsel während 15 Rasttagen* mit je 24 Stunden.

$$(18)\quad A_4 = 0{,}00127 . 15 \cdot \frac{2000 . 2000}{2\,000\,000} \cdot 1{,}39794 = 0{,}05326.$$

Summe der Arbeiten während der Ruhe . . = 0,05686.

Dieser Arbeitsverbrauch trifft zu, wenn immer die gleichen Theile des Sägeblattes während der Ruhezeit auf die Rollen zu liegen kommen; vertheilt sich dagegen dieses Auflegen auf alle Theile gleichmässig, so nimmt die abnützende Wirkung ab im Verhältniss von $L : D\pi$, beträgt also nur

$$0{,}05686 \cdot \frac{3{,}14}{7{,}14} = 0{,}02500.$$

Da aber weder der eine noch der andere dieser extremen Fälle vorkommen wird, so nehmen wir das Mittel aus beiden Werthen 0,05686 und 0,02500 mit 0,03834 als den wahrscheinlichen an. Daher beträgt nun

der Arbeitsverbrauch während der Bewegung . = 0,00532 *mkg;*
der Arbeitsverbrauch während des Stillstandes . = 0,03834 „
und die Summe dieser Verluste in 1 Tag . . = 0,04366 „

Nun kann das Arbeitsvermögen des Sägblattes nicht hoch taxirt werden und zwar wegen der Querschnittsänderungen, welche durch die Zahnlücken entstehen. Nimmt man dasselbe zu 4,5 *mkg* an, so wird die Dauer des Bandes

$$4{,}5 : 0{,}04366 = 103 \text{ Tage.}$$

Diese kurze Dauer wird wesentlich durch die Rasttage (Sonntage etc.) herbeigeführt. Die Pausen betheiligen sich mit 0,03834 : 0,04366 = 0,88, d. h. mit 88 Procenten an der Zerstörung des Sägeblattes. Würde die Säge, immerhin zum Arbeiten bereit, stets abgestellt bleiben, so würde das Arbeitsvermögen des Bandes selbst nach Millionen von Jahren nicht erschöpft. Allein das Band wird, im Sinne obiger Rechnung, 15 mal gerade gestreckt, gebogen und wieder gerade gestreckt. Dieses Hin- und Herbiegen bei hoher Spannung (auf der konvexen und konkaven Seite) ist seiner Haltbarkeit schädlich.

Liesse man in der Rechnung den Arbeitsverbrauch während der Ruhe ausser Betracht, so könnte das Sägeblatt bei 4,5 *mkg* Arbeitsvermögen aushalten

$$4{,}5 : 0{,}00532 = 845 \text{ Tage,}$$

eine Dauer, die absolut aller Erfahrung widerspricht. Wer also den Arbeitsverbrauch während des Stillstandes nicht zugeben will, mag sich umsehen, wie er die frühzeitige Zerstörung des Blattes während der Arbeitsperiode allein erklären kann.

Gesetzt, das Band mache nur Rasttage durch, d. h. es werde täglich auf denselben Zeitpunkt genau 1 mal gedreht, um dann je 24 Stunden in Ruhe zu verbleiben, so würde es täglich je nur einen Wechsel erleiden. Nach Gl. (18) könnte dann die Zahl der Rasttage von 15 auf 1268 ansteigen, bis der Arbeitsverbrauch von 0,05326 auf 4,5 *mkg* stiege. Das Band würde also nach 1268 Tagen, d. h. nach 3 Jahren und 172 Tagen brechen. Das gäbe ein Experiment, das nicht zu lange dauern würde, sich ohne Betriebskraft durchführen liesse und einen Prüfstein für unsere Theorie abgäbe.

In der 5. Auflage der „*Mechanischen Technologie von Karmarsch*“ von 1875 sagt der Herausgeber Dr. *Hartig:* „Diese Art von Sägemaschinen wurde schon vor längerer Zeit mit praktischem Erfolg ausgeführt, wiewohl man den Nachtheil des oftmaligen Zerbrechens der Säge nicht zu beseitigen im Stande ist.“ Das Folgende soll nun zeigen, inwiefern das Brechen möglichst vermieden werden kann.

Wir nehmen an, der Arbeitsverlust, den der Stillstand der Säge herbeiführt, könne, wie das oben behandelte Beispiel zeigt, etwa gleich dem 7,2fachen genommen werden von demjenigen während des Betriebes. Dann kann nur die rechte Seite der Gl. (17) mit 8,2 multiplicirt werden, um den gesammten Arbeitsverbrauch zu finden.

Nun ist die Zeit zu 1 Bandumlauf $= \frac{L}{v}$ Sekunden und die Zeit QM' für den halben Rollenumfang im Verhältniss von $D\pi : 2L$ kleiner, also $= \frac{D\pi}{2v}$ Sekunden; daher wird die Zeit t der Gl. (17)

$$t = \frac{D\pi}{2v} \cdot \frac{1}{3600} \text{ Stunden.}$$

Ferner ist die Anzahl Umläufe des Sägeblattes in der Stunde

$$n = \frac{v}{L} \cdot 60 \cdot 60.$$

Daher durch Multiplikation dieser beiden Gleichungen

$$nt = \frac{D\pi}{2L}.$$

Man führe diesen Werth von nt in Gl. (17) und ersetze noch s durch seinen Werth aus Gl. (16), so folgt als Arbeitsverbrauch in der Stunde

$$A = 8{,}2\,\pi\, c\, E \cdot \frac{h}{D} \cdot \frac{h}{L}. \tag{18}$$

Hier bilden die vier ersten Faktoren für dasselbe Material eine Konstante, welche sich mit der Betriebsweise ändert, allein immerhin für dieselbe Betriebsweise unveränderlich bleibt. Folglich ist die abnützende Wirkung proportional dem Quadrat der Dicke des Sägebandes und verkehrt proportional sowohl der Länge des Bandes wie dem Durchmesser der Rollen.

Um ein Band haltbar zu machen, muss daher das Blatt dünn und lang, sowie der Durchmesser der Rollen gross sein. Sowie D gross genommen wird, fällt ohnehin auch L grösser aus. Indessen ist eine übertriebene Länge L von keinem Vortheil, weil das Sägeblatt auch entsprechend theurer wird. Dagegen ist von entscheidender Wichtigkeit, dass das Blatt möglichst dünn und dafür breiter gehalten wird.

Nehmen wir im obigen Beispiel $D = 1{,}4\ m$; $L = 8\ m$ und $h = 0{,}7\ mm$, so würde die Dauer des Sägeblattes steigen im Verhältniss

$$\frac{0{,}7}{1400} \cdot \frac{0{,}7}{8000} : \frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{7140} = 1 : 3{,}2.$$

Es würde dieses Band also 3,2 mal länger Stand halten als das vorige.

22. Dauer eines Drahtseiles zur Kraftübertragung.

Das Seil läuft über zwei Rollen mit parallelen Achsen. Die eine Rolle erhält ihren Antrieb vom Motor aus und heisst die treibende, die andere die getriebene Rolle. An der letztern macht sich ein Widerstand geltend, der stetig überwunden werden muss. Die Vorgänge sind dieselben wie beim Sägeblatt einer Bandsäge (S. § 21); daher legen wir auch den Grössen

$$D,\ a,\ L,\ v,\ N,\ P,\ s',\ s \text{ und } n$$

dieselbe Bedeutung bei wie dort und ersetzen nur die Blattdicke durch die Drahtdicke, bezw. den Querschnitt bh des Sägeblattes durch den Querschnitt aller Drähte des Seiles.

Nun seien $N = 50$ Pferde und $v = 15\ m$, so ergibt sich nach Gl. (14) als Widerstand am Umfang der getriebenen Rolle

$$P = 75 \cdot \frac{50}{15} = 250\ kg.$$

Wenn die Längenspannung $s' = 300\ kg$ betragen soll, so ergibt sich als Querschnitt aller Drähte

$$250 : 300 = 0{,}8333\ cm^2 = 83{,}33\ mm^2.$$

Nimmt man die Zahl der Drähte zu 72 an, so wird der Querschnitt eines Drahtes $83{,}33 : 72 = 1{,}16\ mm^2$, woraus als Durchmesser des Drahtes sich ergibt

$$d = 1{,}22\ mm.$$

Die Spannung des geführten Seilstückes ist soeben zu 300 *kg* angenommen worden. Allein auf diese Spannung hat nicht nur der Widerstand P Einfluss. Diese Spannung wird wegen vier Ursachen grösser ausfallen: einmal wegen der gewundenen Lage der Drähte im Seil etwa im Verhältniss von 1 : 1,03; dann wegen der Senkung der Seilstücke zwischen den Rollen etwa von 1 : 1,05; ferner wegen der Seilschwankungen, die häufig eintreten und wegen der Verkürzungen, die das Seil erleidet, wenn die Temperatur sinkt. Wegen dieser beiden letztern Ursachen nehmen wir eine Steigerung der Spannung s' von 1 : 1,08 an. Dadurch geht 300 über in 350; also wird aus Gründen, die bei der Bandsäge auseinandergesetzt sind, die Spannung des führenden Seilstückes steigen auf $2\,s' = 700\ kg$.

Läuft nun dieses führende Seilstück auf die Rolle auf, so kommt zu dieser Spannung $2\,s'$ noch die Biegungsspannung s hinzu, so dass auf dieser Rolle die Spannung auf der konvexen Seite des Drahtes $700 + s$ beträgt. Allein diese Summe soll die Grenze der Elasticität des Drahtes, also 1500 *kg*, nicht erreichen. Man kann daher für s, wie das häufig geschieht, 600 *kg* annehmen. Dadurch geht die grösste im Draht entstehende Spannung nicht über 1300 *kg* hinaus.

Wenn daher $E = 1\,800\,000\ kg$, so wird nach Gl. (16)

$$D = d\,\frac{E}{s} = 1{,}22 \cdot \frac{1\,800\,000}{600} = 3660\ mm.$$

Nun entstehen Spannungswechsel während des Betriebes und während der Betriebseinstellung. Diese vollziehen sich in ähnlicher Weise wie beim Sägeblatt einer Bandsäge, weshalb auch die Fig. 9 und 10 hier beigezogen werden können; nur muss man sich die

Rollenachsen neben einander und weit auseinander denken. Einer der Wechsel dauert gerade so lange, so lange das Seil aufgelegt bleibt mit den Uebergängen von 0 auf $s' = 350$ und von 350 auf 0. Das Diagramm ist in Fig. 10 schräg schraffirt und hat eine Breite $= 350$. Da dieser Wechsel nur einmal vorkommt, so kann er seiner Kleinheit wegen ausser Betracht fallen.

a) Wechsel während des Betriebes.

Der erste dieser Wechsel, in der Figur aufrecht schraffirt, wiederholt sich per Seilumlauf einmal; er dauert von N bis M'. Dabei steigt die Spannung von s' auf $2s'$, also von 350 auf 700, hält während der Zeit NM' in dieser Stärke an und sinkt dann auf 350 zurück.

Es sei $a = 80\ m$, so wird

Seillänge $L = 2a + D\pi = 160 + 11{,}5 = 171{,}5\ m.$

Zeit zu 1 Umlauf . . . . . $L : v = 11{,}43$ Sek.

Zeit QM' . . . . . $11{,}43 \cdot \frac{D\pi}{2L} = 0{,}385$ „

Zeit NM' . . . . . $11{,}43 \cdot \frac{a + D\pi}{2a + D\pi} = 6{,}10$ „

Anzahl Umläufe per Stunde . . . . $\frac{3600\,v}{L} = 315.$

Da bei diesen Wechseln $t = 6{,}1 : 3600$ Std., und für 1 Jahr zu 300 Tagen, den Tag zu 11 Stunden gerechnet, $n = 315 \cdot 300 \cdot 11$, so gibt Gl. (11) für 1 Jahr als Arbeitsverlust

$$A_1 = 0{,}000924 \cdot 315 \cdot 300 \cdot 11 \cdot \frac{700^2 - 350^2}{1\,800\,000} \cdot \frac{6{,}1}{3600} = 0{,}03023.$$

Zwei weitere Wechsel entstehen beim Auflaufen der flachen Seilstücke auf die Rollen, also bei den Uebergängen von N nach P und von Q nach M'. Dabei steigt die Spannung von $2s'$ auf $2s' + s$ und geht beim Ablaufen wieder zurück auf $2s'$; daher für $t = 0{,}385 : 3600$ der Arbeitsverlust per Jahr

$$A_2 = 2 \cdot 0{,}000924 \cdot 315 \cdot 300 \cdot 11 \cdot \frac{1300^2 - 700^2}{1\,800\,000} \cdot \frac{0{,}385}{3600} = 0{,}13695.$$

Summe der Verluste während des Betriebes . . . $= 0{,}16718.$

b) Spannungswechsel während des Stillstandes.

Die Spannungen der 80 *m* langen Stücke des Seiles gleichen sich beim Abstellen aus, so dass jedes Stück 525 *kg* Spannung annimmt. Daher kann man sich über dem schräg schraffirten Diagrammstreifen der Fig. 10 einen neuen, ihm parallelen denken, dessen Länge gleich ist der Dauer des Stillstandes und dessen Breite zwischen den Spannungen 350 und 525 *kg* liegt. Dieser neue Streifen stellt den ersten Spannungswechsel für den Zustand der Ruhe dar.

Dazu kommen die Spannungswechsel, welche die Seilstücke erleiden, die während der Ruhezeit auf den Rollen liegen. Der Einfachheit wegen nehmen wir die Wechsel auf beiden Rollen gleich gross an, mit dem Ansteigen von $1{,}5\,s'$ auf $1{,}5\,s' + s$; dem Verbleiben in dieser letztern Spannung und mit dem Rückgang auf $1{,}5\,s'$.

Diese sämmtlichen Wechsel treten ein über Mittag, über Nacht und während der Rasttage.

Wechsel über Mittag. Dauer 1 Std.; $log\,(1+t) = 0{,}30103$; in 1 Jahr $n = 300$. Daher für die flachen Stücke der Arbeitsverlust

$$A_3 = 0{,}00213 \cdot 300 \cdot \frac{525^2 - 350^2}{1\,800\,000} \cdot 0{,}30103 = 0{,}01636$$

und für die beiden aufgebogenen

$$A_4 = 2 \cdot 0{,}00213 \cdot 300 \cdot \frac{1125^2 - 525^2}{1\,800\,000} \cdot 0{,}30103 = 0{,}21159.$$

Wechsel über Nacht. Dauer 12 Stunden. Ganz ebenso für $n = 300$ wird

$$A_5 = 0{,}05986; \qquad A_6 = 0{,}71318.$$

Wechsel an 65 Rasttagen. Dauer $t = 24$ Sd. Arbeitsverluste

$$A_7 = 0{,}01616; \qquad A_8 = 0{,}35884.$$

Daher Summe $A_3 + A_5 + A_7 = 0{,}09238,$

„ „ $A_4 + A_6 + A_8 = 1{,}28361.$

Die letzte Summe setzt voraus, dass immer die gleichen Theile des Seiles während der Ruhe sich auf die Rollen legen, während die andern Theile nicht von diesen Spannungswechseln betroffen werden. Setzt man aber voraus, dass alle Theile gleichförmig an die Reihe kommen, so vertheilt sich die abnützende Wirkung von der Länge $D\pi$ auf die Länge $2a + D\pi$, also von 11,5 *m* auf

171,5 *m*; alsdann wird das von diesem Spannungswechsel absorbirte Arbeitsvermögen 1,28361 *mkg* sinken auf

$$1{,}28361 \cdot \frac{11{,}5}{171{,}5} = 0{,}08607 \; mkg.$$

Nun wird weder der eine noch der andere dieser extremen Fälle eintreten; weshalb wir das Mittel aus beiden als den wahrscheinlichen Werth betrachten. Dieses Mittel ist = 0,68484 *mkg*. Hiernach ergibt sich nun folgender Arbeitsverbrauch:

Während des Betriebes		= 0,16718	*mkg*
Während des Stillstandes:	durch flache Streckung	= 0,09238	„
	durch Aufbiegen . .	= 0,68484	„
Summe dieser Arbeiten		= 0,94440	„

Der Draht zu Seilen darf nicht ausgeglüht sein, um die nur zu leicht eintretende Verstreckung, d. h. das *Schlaffwerden* des Seiles zu verhüten. Allein gerade deswegen ist das Dehnungsvermögen des Drahtes, daher auch sein Arbeitsvermögen, nur ein mässiges. Nehmen wir dasselbe zu 4 *mkg* an, so wird mit Rücksicht auf die Spannungswechsel allein die Dauer des Seiles

$$4 : 0{,}9444 = 4{,}23 \text{ Jahre.}$$

Allein es gibt noch andere Ursachen, welche zerstörend auf die Drähte einwirken. Das ist in erster Linie die Reibung der Drähte unter einander, welche Reibung die Querschnitte der Drähte reduzirt; dann das Rosten, das gerade an den Stellen rasch vor sich geht, wo das Eisenoxyd an der Oberfläche abgerieben ist; ferner eine schlechte Ausfütterung der Rollen und endlich das Anschlagen des Seiles an die Rollenkränze im Falle starker Seilschwingungen. Mit Rücksicht auf diese Einwirkungen können wir das Alter obigen Seiles füglich auf 3 Jahre hinunter setzen. Hiebei würde die Wirkung der Spannungswechsel nahe 0,7, die der andern Ursachen 0,3 des Arbeitsverbrauches ausmachen.

Herr Ingenieur *David Ziegler,* der für die Firma *J. J. Rieter & Co.* in Töss bei Winterthur die grössten Drahtseil-Transmissionen auf dem Kontinent erstellte, gibt in seiner Schrift „Erfahrungsresultate über Betrieb und Instandhaltung der Drahtseiltriebe, Winterthur, 1871“ drei Jahre als durchschnittliche Dauer eines Drahtseiles an.

Wenn mehrere Drahtseile, unter sonst gleichen Umständen, ungleiche Dauer aufweisen, so liegt die Vermuthung nahe, dass bei ihnen erhebliche Abweichungen von dem Mittel aus den extremen

Werthen vorkamen. Es können dadurch, besonders bei langen Seilen, sehr erhebliche Unterschiede entstehen.

Selbstverständlich hängt die Dauer, wie diejenige des Sägeblattes einer Bandsäge, von der konstruktiven Anordnung ab.

Um eine Konstruktionsregel abzuleiten, gehen wir vom obigen Spannungswechsel für A_2 aus und schreiben dafür allgemein für den Arbeitsverbrauch in 1 Stunde

$$A = 2cn\frac{(s+2s')^2 - (2s')^2}{E}t,$$

wo die Konstante $2c$ dann so zu wählen ist, dass sie sich auf alle Arbeitsverluste bezieht.

Man hat nun zunächst wie beim Sägeblatt für eine Stunde Betrieb

$$nt = \frac{D\pi}{2L}.$$

Führt man diesen Werth in die letzte Gleichung ein und berücksichtigt, dass die Differenz der Quadrate über dem Bruchstriche $= s^2 + 4ss'$ ist, so folgt

$$A = \pi c\frac{D}{L}\frac{(s+4ss')}{E}.$$

Nimmt man s vor die Klammer und ersetzt $s : E$ durch $d : D$, so folgt

$$A = \pi c\frac{d}{L}(s+4s'). \tag{19}$$

Das ist nun die gesuchte Regel. Die abnützende Wirkung ist daher proportional der Drahtdicke, verkehrtproportional der Seillänge und proportional der Spannungssumme $s + 4s'$.

Nimmt man in Gl. (19), wie bei Sägeblatt, s' so klein an, dass $4s'$ gegen s vernachlässigt werden kann, so geht Gl. (19) sofort über in Gl. (18), abgesehen vom Werth der Konstanten.

Um die Konstante πc der Gl. (19) für den Fall zu bestimmen, dass A den Arbeitsverbrauch per Jahr bezeichne und zwar für alle zerstörenden Ursachen (was bei Aufgaben dieser Art als zulässig betrachtet werden mag), so nehme man im Anschluss auf obiges Beispiel $A = 4 : 3$; $d = 1{,}22\ mm$; $L = 171{,}5 \cdot 1000\ mm$; $s = 600$ und $s' = 350$, so wird

$$\pi c = \frac{A\,L}{d(s+4s')} = 94.$$

Daher geht Gl. (19) über in

$$A = 94 \frac{d}{L} (s + 4s'). \tag{20}$$

In einem ungünstigen Falle sei nun $d = 1{,}5\ mm$; $L = 80 \cdot 1000\ mm$; $s = 900$ und $s' = 400$; so wird $A = 4{,}41\ mkg$. Da nun 4 *mkg* zu verbrauchen sind, so beträgt die Dauer des Seiles

$$4 : 4{,}41 = 0{,}91 \text{ Jahre.}$$

23. Die Festigkeitsversuche von Wöhler.

Wöhler hat 220 Versuche gemacht mit Stäben, wie sie auf Seite 8 erwähnt sind, zu dem Zwecke, zu bestimmen, wie viel „Schwingungen" (Spannungswechsel) ein Konstruktionstheil aus Schmiedeisen oder Stahl aushalten könne, bis er bricht. Er stellte die Resultate der Versuche in 17 Tabellen zusammen.

Die vier ersten enthalten Versuche mit belasteten Stäben, welche (innerhalb bestimmter Grenzen) kontinuirlich nach einer Richtung gebogen wurden; die fünf folgenden mit Stäben, welche (innerhalb bestimmter Grenzen) kontinuirlich nach einer Richtung gebogen wurden; die drei weitern mit Stäben, welche kontinuirlich verstreckt wurden, und einen Versuch über kontinuirliche Verdrehung. Endlich sind in vier Tabellen die Resultate von Zerreissungs- und Dehnungsproben mitgetheilt, welche dazu dienen, das Arbeitsvermögen des verwendeten Materials annähernd zu bestimmen.

Man ersieht hieraus, dass Wöhler dreierlei Spannungswechsel in Scene setzte:

1. Einfache Spannungswechsel erster Art, nach Fig. 3, mit Uebergang der Spannung von 0 auf s und wieder zurück auf 0.

2. Einfache Spannungswechsel erster Art, nach Fig. 4, mit Uebergang der Spannung von 0 auf s, von da auf 0 und $-s$, von hier über 0 nach $+s$ u. s. w., und

3. Eine Art zusammengesetzter Wechsel, nach Fig. 6, mit Uebergang der Spannung vom kleinern Werth s' nach dem grössern s und zurück auf s'.

Die Stäbe wurden in der Festigkeitsmaschine gedreht und während der Drehung den Spannungswechseln unterworfen. Diese Wechsel vollzogen sich gleichförmig und regelmässig; die Zahl der Umdrehungen der Stäbe mag 66 bis 70 per Minute betragen haben.

Um unsere Hauptgleichung auf diese Versuche anwenden zu können, nehmen wir an: Zeit zu einer Drehung $t = 0{,}90 : 3600$, und abgerundet 1 Ctr. = 50 *kg*, 1 Quadrat-Zoll = 6,84 cm^2.

A. Versuche mit Schmiedeisen von der Gesellschaft Phönix von 1857.

Modul $E = 1\,800\,000$; Arbeitsvermögen $A = 5{,}6$.

Tab. I.

Stäbe mit schlanker Hohlkehle abgesetzt; belastet und dabei kontinuirlich gedreht. Jeder Umdrehung entsprechen zwei Spannungswechsel (auf Zug und Druck).

No.	Grösste Spannung		Anzahl Drehungen bis zum Bruche	
	Ctr.	*kg*	nach Wöhler.	nach Gleichung.
1	320	2339	56 430	
2	300	2193	99 000	
3	280	2047	103 145	
4	260	1901	479 490	
5	240	1755	909 810	
6	220	1608	3 632 588	16 865 000
7	200	1462	4 917 992	20 409 000
8	180	1316	19 186 791	25 196 000
			Noch in Betrieb nach	
9	160	1170	132 250 000	31 495 000
10	—	900	—	50 000 000
11	—	600	—	121 500 000
12	—	300	—	496 000 000

Wir begleiten diese Resultate mit folgenden Bemerkungen:

Die ersten 6 Versuche zeigen Spannungen, welche über die Grenze der Elasticität hinaus gehen; diese hätten füglich ausfallen dürfen. Denn jeder Konstrukteur weiss, auch ohne dass besondere Versuche gemacht werden, dass bei solchen Spannungen das Material bald zu Grunde geht. In No. 7 hält sich die Spannung gerade an der Elasticitätsgrenze; daher kommen nur drei Versuche vor, die für den Konstrukteur von Werth sind.

Man erkennt, dass das Material der Stäbe ungleich war. Vom Stab No. 6 auf 7 steigt die Tourenzahl auf das 1,4fache; von No. 7 auf 8 auf das 4fache, obschon beide Spannungsdifferenzen gleich waren. Offenbar war das Material von No. 6, besonders aber das von 7 ein schlechtes. Dieses hielt nur 4,9 Millionen Drehungen aus, während es als normales Eisen nach unserer Gleichung 20 Millionen hätte aushalten sollen.

Bei No. 8 ist die Tourenzahl unserer Gleichung, gemäss der auf Seite 22 gemachten Annahme, etwas grösser als die Wöhler'sche.

Bei No. 9 war der Stab noch in Betrieb, nachdem er 132

Millionen Umdrehungen gemacht hatte. Unsere Gleichung gibt dafür 4,2 mal weniger, selbst für den Bruch. Dieser auffallende Sprung von 19 auf 132 Millionen Drehungen, bei so geringer Spannungsdifferenz, lässt sich nur schwer erklären, selbst wenn das Material von No. 9 ein ausgezeichnetes war. Gerade hier wären nun mehr Versuche am Platz gewesen; denn bei 1170 *kg* Spannung abbrechen, auf einen einzigen Versuch hin, und Schlüsse daraus ziehen, wie dies Wöhler gethan hat, ist denn doch nicht statthaft.

Trägt man die Resultate graphisch auf, indem man z. B. die Spannungen als Abscissen, die Zahl der Umdrehungen als Ordinaten annimmt, so entstehen zwei Kurven. Unsere Kurve zeigt einen stetigen Verlauf. Die Wöhler'sche Kurve kann, wegen der Verschiedenheit des Materials, einen stetigen Verlauf nicht nehmen; aber eine gewisse *Annäherung an die Stetigkeit* sollte doch vorhanden sein, namentlich bei dem Theil der Kurve, der innerhalb der Elasticitätsgrenze liegt. Dieser geht durch drei Punkte (für No. 7, 8 und 9), steigt aber von Punkt 8 auf 9 so plötzlich, dass die Kurve für einen benachbarten weitern Punkt No. 10 schon ins Unendliche verlaufen müsste, was unmöglich und wogegen der Physiker sich erklären muss. Es fehlt noch ein Versuch mit einer Spannung von etwa 900 oder 800 *kg*, um mit Sicherheit die Richtung der Kurve festzustellen, beziehungsweise die Kurve bei Punkt 9 korrigiren zu können. So bleibt, trotz oder wegen der 132 Millionen Drehungen, der darauf basirte Wöhler'sche Schluss ein gewagter. Er lautet:

„Wenn der auf relative Festigkeit belastete Versuchsstab kontinuirlich gedreht wurde, so dass bei jeder Umdrehung in derselben Faser ein Uebergang aus der grössten Zugsspannung in die grösste Druckspannung und umgekehrt stattfand, erfolgte der Bruch noch bei 180 Ctr. pro Quadratzoll grösster Faserspannung; bei 160 Ctr. trat er nicht mehr ein, obschon der Stab schon weit über hundert Millionen Biegungen erlitten hatte. Die Bruchgrenze (!) kann daher bei 160 Ctr. pro Quadratzoll Faserspannung angenommen werden. Da die Grenzspannungen positiv und negativ waren, so ist die massgebende Differenz = 320 Ctr.“

Nach dem von Wöhler oben S. 8 mitgetheilten Satz: „Der Bruch des Materials lässt sich auch durch vielfach wiederholte Schwingungen, von denen keine die absolute Bruchgrenze erreicht, herbeiführen,“ sollte man einen Schluss, wie den soeben gezogenen, gar nicht erwarten. Man erwartet im Gegentheil etwa folgenden: Bricht der Stab noch nicht bei 132 Millionen Umdrehungen, so bricht er vielleicht schon bei 135 oder 140 Millionen; er bricht

jedenfalls, selbst auch dann, wenn er schwächere Spannungen auszuhalten hat, nur macht er dann eine noch weit grössere Anzahl Drehungen, bis er bricht.

Hielt Wöhler die Festigkeitsmaschine täglich 12 Stunden im Gange, so machte sie im Jahr, zu 310 Tagen gerechnet, 66·60·12·310 = 14731200 Drehungen; sie brauchte also zu 132 Millionen Drehungen 9 Jahre. Das wäre eine lange Zeit zu einem einzigen Versuche. Allein manche Theile unserer Maschinen sollen 50 und mehr Jahre Stand halten. Da ist es sicher unstatthaft, dem Konstrukteur eine Grenze von 160 Ctr. anzugeben, unter welcher ein Bruch nicht mehr erfolgen könne.

Der Vollständigkeit wegen sei erwähnt, dass Wöhler die Versuche nicht bei No. 9 abgebrochen, sondern bis zu No. 23 fortgeführt hat, allein mit Stäben, die „scharf abgesetzt“ waren. Diese brachen, selbst bei einer Spannung unter 140 Ctr., bei einer geringen Anzahl Umdrehungen und kommen hier nicht in Betracht.

Tab. V.

Stäbe, kontinuirlich nach einer Richtung gebogen.
Jeder Drehung entspricht ein Spannungswechsel.

No.	Grösste Spannung		Anzahl Drehungen bis zum Bruche	
	Ctr.	*kg*	nach Wöhler.	nach Gleichung.
1	550	4020	169 750	
2	500	3655	420 000	
3	450	3289	481 950	
4	400	2925	1 320 000	10 200 000
5	360	2632	4 035 000	12 710 000
6	320	2339	Noch im Betrieb nach 3 420 000	15 940 000
7	300	2193	Noch im Betrieb nach 48 200 000	18 290 000

Die hier angewendeten Spannungswechsel reichen zum Theil *weit* über die Elasticitätsgrenze hinaus; sie können daher nicht massgebend sein für Aufstellung eines Gesetzes. Gleichwohl sagt Wöhler dazu:

„Nach Tab. V wurde dasselbe Material bei einseitiger Biegung noch zum Bruche gebracht bei 360 Ctr. pro Q.-Zoll grösster Faserspannung, bei 300 Ctr. ist der Bruch nach mehr als 48 Millionen Biegungen noch nicht eingetreten. Die Grenzspannungen waren 0 und 300 Ctr. Folglich ist die massgebende Spannungsdifferenz = 300 Ctr.“

Dem kann Folgendes entgegengehalten werden. Einmal ist von einer annähernden Stetigkeit der Spannungswechsel-Kurve nicht die Rede; für die kleineren Spannungen steigt sie von 1,3 Millionen auf 4, sinkt dann wieder auf 3,4, um sich sprunghaft bei einer sehr kleinen Spannungsdifferenz auf 48 Millionen zu erheben. Hier fehlen wenigstens zwei Versuche, etwa mit Spannungen von 1500 und 1000 *kg*, um die Lage des Punktes No. 7 entweder bestätigen oder korrigiren zu können.

Sodann genügen die 48 Millionen Spannungswechsel, gesetzt auch, sie seien für normale Verhältnisse richtig, noch nicht, um den Wöhler'schen Satz zu rechtfertigen. Der Stab No. 7 sei Theil einer Maschine; er arbeite wie beim Wöhler'schen Versuche, so hält er bei 48 Millionen Spannungswechseln nur 3 Jahre aus, den Tag zu 12 Stunden und das Jahr zu 300 Tagen gerechnet. Damit wäre dem Eigenthümer der Maschine nicht gedient. Daher vermindert Wöhler bei dieser Art von Spannungswechseln die Bruchgrenze auf eine Sicherheitsgrenze von 180 Ctr. oder 1316 *kg*. Diese Reduktion ist vorsichtig, aber auch willkürlich, weil nicht durch Versuche belegt.

In den Tab. I und V kommt die Spannung 300 Ctr. vor. Da machte der Wöhler'sche Stab nach Tab. I nur 2 · 99 000, nach Tab. V dagegen mehr 48 200 000 Spannungswechsel durch, also im einen Fall 243,4 mal mehr als im andern. Zwar erlitt im ersten Fall der Stab Wechsel von + 300 Ctr. Spannung in — 300 Ctr., während die Grenzen beim andern 0 und + 300 Ctr. waren. Hierin liegt ein Unterschied. Ob er aber einen Sprung vom Einfachen auf das 243,4fache rechtfertigen kann, glauben wir nicht.

Tab. X.

Stäbe, innerhalb bestimmter Grenzen kontinuirlich gedehnt; mit schlanker Hohlkehle abgesetzt.

No.	Grösste Spannung		Zahl der Drehungen bis zum Bruche	
	Ctr.	*kg*	nach Wöhler.	nach Gleichung.
1	480	3509	800	
2	440	3216	106 910	
3	400	2924	340 853	
4	360	2632	409 481	12 598 000
5	360	2632	480 852	12 598 000
6	320	2339	10 141 645	15 944 000
	Eingrenzende Spannung			
7	$^{440}/_{200}$	$^{3216}/_{1462}$	2 373 244	10 620 000
			Noch im Betrieb nach	
8	$^{440}/_{240}$	$^{3216}/_{1754}$	4 000 000	11 990 000

Die Spannungen sind hier wieder zu gross gewählt; der Sprung in der Tourenzahl von No. 5 auf 6, nämlich auf das 21fache, zeigt den gleichen Charakter, auf den wir bei den früheren Versuchen aufmerksam gemacht haben. Die erste Art der Versuche schon bei 10 Millionen abbrechen, scheint uns nicht richtig; denn als Maschinentheil hätte der Stab nur $^2/_3$ eines Jahres ausgehalten.

Beim Stab No. 5 dieser Tab. beträgt die Zahl der Spannungswechsel nur 480 852, während sie bei gleicher Spannung in No. 5 der Tab. V beträgt 4 035 000, also nahe neunmal mehr, und zwar für Spannungswechsel ähnlicher Art.

Augenscheinlich war das Material von No. 5 der Tab. X ein schlechtes, das von No. 6 nur ein mittleres; denn unsere Gleichung gibt mehr Touren als der Versuch.

Die Stäbe No. 7 und 8 zeigen einen zusammengesetzten Wechsel nach Fig. 6, mit Steigen der Spannung von s' auf s und zurück auf s'. Bei 7 setzt unsere Gleichung ein besseres Material voraus, als es Wöhler verwendet, und bei 8 hätte der Stab annähernd 3 mal mehr aushalten können, wenn er länger beobachtet worden wäre. Bei unsern Tourenzahlen sind die Wechsel $Oimn$, Fig. 6, als kleine nicht berücksichtigt worden.

B. Versuche mit Stäben aus Gussstahl-Achsen.

$E = 2\,160\,000$; $A = 7{,}5$.

Tab. III a.

Gussstahl von Krupp von 1857; Stäbe mit schlanker Hohlkehle abgesetzt, belastet und kontinuirlich gedreht. Eine Umdrehung gibt zwei Spannungswechsel.

No.	Grösste Spannung		Anzahl Umdrehungen bis zum Bruche	
	Ctr.	*kg*	nach Wöhler.	nach Gleichung.
4	320	2339	642 675	
5	320	2339	1 665 580	21 600 000
6	320	2339	3 114 160	
				Wahrscheinl. Mittel
7	300	2193	4 163 375	24 600 000
8	300	2193	45 050 640	

Die Stäbe der drei ersten Versuche zeigen ein sehr ungleiches Verhalten, und zwar für gleiche Spannung. Stab No. 6 vermochte 5 mal mehr Drehungen bis zum Bruche auszuhalten als No. 4.

Noch ungleicher aber verhielten sich die Stäbe No. 7 und 8; denn der letztere hielt bei gleicher Spannung 11 mal mehr Drehungen aus als der erstere. Der richtige Werth, d. h. derjenige für normales Material, mag nahe in der Mitte liegen, wie er auch unserer Gleichung zu Grunde gelegt ist. Wendet man diesen Werth auf die Versuche No. 4—6 an, so erhält man eine Umdrehungszahl bis zum Bruche = 21 Millionen, also weit mehr, als Wöhler in Wirklichkeit gefunden hat. Wöhler legt nur dem letzten *einzigen* Versuche Gewicht bei. Er schreibt darüber:

„Wenn der auf relative Festigkeit belastete Stab (nach Tab. III) kontinuirlich gedreht wurde, trat der Bruch bei 300 Centner grösster Faserspannung noch ein nach 45 Millionen Umdrehungen. Die Bruchgrenze ist daher bei 280 Centner pro Quadrat-Zoll Faserspannung anzurechnen. Die dabei stattfindende Differenz der eingrenzenden Spannungen ist 560 Centner."

Warum der zweitletzte Versuch nicht auch wie der letzte in Betracht zu ziehen sei, begreifen wir nicht.

Tab. XII.

Stahl von Krupp von 1862; Stäbe kontinuirlich nach einer Richtung verbogen.

No.	Grösste Spannung		Zahl der Drehungen bis zum Bruche	
	Ctr.	*kg*	nach Wöhler.	nach Gleichung.
1	550	4020	1 762 300	14 560 000
2	525	3838	1 031 200	15 980 000
4	500	3655	5 234 200	17 620 000
5	500	3655	Noch in Betrieb nach 40 600 000	17 620 000

Bei No. 1 und 2 ist die berechnete Zahl der Umdrehungen weit grösser als die nach Versuch; bei No. 4 und 5 liegen die berechneten Werthe zwischen den beobachteten und zwar nur wenig unter dem Mittel der erstern. Da hier die Spannung für beide dieselbe war, so ist es auffallend, dass der fünfte Versuch über 8 mal mehr Umdrehungen gab als der vierte und *allein* Gewicht haben soll. Wöhler fügt nämlich bei:

„Das Material ist bei einseitiger Biegung in einem Falle durch 500 Centner Faserspannung nach 5 Millionen Biegungen noch zum Bruch gebracht, während im andern Falle der Bruch nach 40 Millionen Biegungen noch nicht eintrat. Die Bruchgrenze kann daher bei 480 Centner (?) Faserspannung angenommen werden, und da

die Biegung zwischen dieser Maximalspannung und 0 stattfindet, ist die massgebende Differenz der Spannungen 480 Centner."

Tab. XIII.

Gussstahl von Krupp von 1862; Stäbe mit schlanker Hohlkehle abgesetzt; kontinuirlich verdreht und zwar

a) nach gleicher Richtung (Spannung von 0 auf *s* und zurück auf 0).

No.	Grösste Spannung		Zahl der Umdrehungen bis zum Bruche	
	Ctr.	*kg*	nach Wöhler.	nach Gleichung.
1	480	3509	198 600	
2	450	3289	373 800	
3	420	3070	334 750	
4	400	2924	879 700	27 550 000
			Noch im Betrieb nach	
5	380	2778	23 850 000	30 530 000

Der Stab des fünften Versuches war noch im Betrieb nach 23,8 Millionen Umdrehungen. Nach unserer Gleichung hätte er bis zum Bruche 30,5 Millionen Drehungen machen können.

Auffallen muss die geringe Anzahl Drehungen, welche die Stäbe von No. 1—4 machten.

b) Nach zwei Richtungen (hin und her).

Eine Umdrehung gibt zwei Spannungswechsel.

No.	Grösste Spannung		Zahl der Umdrehungen bis zum Bruche	
	Ctr.	*kg*	nach Wöhler.	nach Gleichung.
6	280	2047	187 500	26 000 000
7	260	1900	1 007 550	30 100 000
8	240	1757	979 700	35 400 000
			Noch im Betrieb nach	
9	220	1607	19 100 000	42 100 000

Bei der stetigen und schwachen Abnahme der Spannungen bilden die Tourenzahlen eigenthümliche Sprünge. Offenbar war das Material von No. 8 sehr schlecht und die Tourenzahl für No. 6—8 sehr klein. Stab No. 9 könnte nach der Gleichung 23 Millionen Umdrehungen mehr machen als sie Wöhler hat durchführen lassen.

Tab. III.

Gussstahl vom Bochumer Verein von 1863. Stäbe mit schlanker Hohlkehle abgesetzt; belastet und kontinuirlich gedreht.

Eine Drehung gibt 2 Spannungswechsel. Wir nehmen E und A wie oben.

No.	Grösste Spannung		Zahl der Umdrehungen bis zum Bruche	
	Ctr.	*kg*	nach Wöhler.	nach Gleichung.
3	320	2339	627 000	21 500 000
4	320	2339	20 467 780	21 500 000
5	300	2193	2 845 250	24 500 000
			Noch im Betrieb nach	
6	300	2193	57 360 000	24 500 000
7	280	2047	3 558 700	28 100 000
			Ausser Betrieb gesetzt nach	
8	260	1900	14 176 171	32 700 000

Die Wöhler'schen Umdrehungszahlen leiden auch hier durch den Mangel an Stetigkeit. Obschon die Stäbe No. 3 und 4 auf gleiche Spannung beansprucht waren, vermochte doch No. 4 über 30 mal mehr Drehungen auszuhalten als No. 3; obschon No. 6 stärker gespannt war als No. 7, so machte er doch 16 mal, sage 16 mal mehr Spannungswechsel durch als No. 7. Was soll nun Geltung haben? Das Einfache oder das 30fache; das Einfache oder das 16fache? Das Mittel aus den Wöhler'schen Tourenzahlen der Stäbe No. 4—7 beträgt 21 Millionen, das unserer Tourenzahlen 24 Millionen. Dabei ist allerdings angenommen, Stab No. 6 sei bei 57 Millionen Umdrehungen gebrochen; er konnte aber wohl noch eine Anzahl Millionen Wechsel aushalten. Damit rückt das Wöhler'sche Mittel dem unsern so nahe, dass sie bei solchen Rechnungen als gleich betrachtet werden können. Unsere Gleichung steht also nicht im Widerspruch mit den Wöhler'schen, sondern schliesst sich meistens an dessen mittlere Resultate an. Stab No. 8 hätte nach unserer Gleichung mehr wie doppelt so viel Umdrehungen aushalten können, als in der Wöhler'schen Rubrik eingetragen sind.

Wöhler zieht folgende Schlüsse aus seinen Versuchen:

Es können bei Inanspruchnahme auf Biegung und auf Zug mit *gleicher Sicherheit gegen den Bruch* Schwingungen stattfinden in den Grenzen

für Eisen { zwischen + 160 Ctr. und — 160 Ctr. / „ + 300 „ „ Null / „ + 440 „ „ + 240 „ } Spannung pro Q.-Zoll.

Für Konstruktionen von „unbegrenzter Dauer“ verlangt er aber Reduktion dieser Spannungen durch einen Sicherheitsfaktor; als solcher ist „unter allen Umständen 2 ausreichend“. Dividirt man die vorstehenden Werthe durch 2 und setzt die Resultate in *kg* für cm^2 um, so erhält man für die drei Arten von Spannungswechseln

(*a*) + 585 und − 585 *kg*;
(*b*) + 996 „ Null;
(*c*) + 1316 „ + 877 *kg*.

Diese Werthe sind für die Forderung einer „unbegrenzten Dauer“ zu gross. Kaum ein Konstrukteur wird sie befolgen. Wöhler kommt eben dazu, weil er jede Versuchsreihe mit einem Stabe abschliesst, dessen Material höchst wahrscheinlich ein ausgezeichnetes war, das also weit mehr aushalten konnte als normales Material. Er hat mittlere Werthe nicht berücksichtigt.

Wöhler hat die Stäbe, bei denen er auf den Bruch durch Spannungswechsel verzichtete, nicht näher untersucht. Er hätte finden müssen, es sei ihr Arbeitsvermögen durch jene Millionen Spannungswechsel geschwächt worden. Die Tab. VII führt zwei Stäbe auf mit je 500 Ctr. Spannung; der eine brach bei 5 Millionen Drehungen; der andere blieb nach 40 Millionen Drehungen noch in Betrieb. Wie nahe mag dieser dem Bruche gewesen sein?

Früher kannte die Konstruktionslehre drei Grenzen: die Bruchgrenze, die Elasticitätsgrenze und die Sicherheitsgrenze. Die beiden ersten wurden durch Versuche ermittelt, die letztere wählte man nach dem höhern oder geringern Grad der Beanspruchung. Seit Wöhler gibt es noch eine aus den wiederholten Spannungswechseln abgeleitete Bruchgrenze und eine unter ihr liegende, besondere Sicherheitsgrenze. Ueberschreitet man diese nicht, so erhält der Konstruktionstheil eine „unbegrenzte Dauer“.

Wöhler hat nur drei Arten von Spannungswechseln durchgeführt, und zwar von solchen, die sich schnell vollziehen; allein es gibt auch Wechsel von langer Dauer. Wöhler gibt die Dauer der von ihm veranstalteten Spannungswechsel gar nicht an; er fügt auch nicht bei, dass die gewonnenen Resultate nur für solche Geltung haben. Darum bei Vielen die Meinung, die Wöhler'schen Schlüsse seien auf jede Art von Spannungswechseln anwendbar, auch auf solche von langer Dauer. Das ist sicher ein schwerer Irrthum, der schon viel Unheil angerichtet hat.

24. Die gleiche Sicherheit nach Wöhler und unserm Gesetz.

Die Richtigkeit der oben angegebenen absoluten Werthe der Wöhler'schen Sicherheitsgrenzen wollen wir dahingestellt sein lassen, sondern nur ihr Verhältniss unter einander prüfen.

Wir denken uns zu diesem Ende eine Maschine mit drei Theilen, welche die oben unter *a, b* und *c* angegebenen Spannungswechsel durchmachen und auf welche unsere Hauptgleichung (11)

$$A = c \frac{s^2 - s'^2}{E} n t$$

in dem Sinne Anwendung finden soll, dass für alle drei Theile die Grössen *A, E, c* und $n t$ gleich seien, immerhin t klein vorausgesetzt, so wird auch die Spannungsfunktion $s^2 - s'^2$ für alle Theile gleichen Werth haben müssen.

Nun macht im Falle (*a*) der Maschinentheil 2 Wechsel bei jeder Drehung, und zwar von 0 auf $+ s$ und zurück auf 0; dann von hier auf $- s$ und zurück auf 0. Daher wird jene Spannungsfunktion $= 2 s^2$, also nach Wöhler

(*a*) $$2 s^2 = 2 \cdot 585^2 = 684\,450.$$

Im Falle (*b*) hat man Wechsel von 0 nach einer unbekannten Spannung x und zurück auf 0. Daher muss für gleiche Sicherheit sein

(*b*) $$x^2 = 684\,450; \; x = 827.$$

Für diesen Werth 827 gibt Wöhler 996 an.

Endlich wird im Falle (*c*) die Spannungsfunktion zur Differenz $y^2 - y'^2$, worin wir nach Wöhler $y' = 877$ annehmen wollen. Daraus erhält man für gleichen Grad der Sicherheit

(*c*) $$y^2 - 877^2 = 684\,450; \; y = 1206.$$

Wöhler gibt 1316 für diesen Werth $y = 1206$ an.

Man ersieht, dass unsere Gleichung keine sehr abweichenden Resultate liefert. Wahrscheinlich sind sie die richtigern, weil sie nicht beeinflusst sind durch Ergebnisse, die aus Material von sehr ungleicher Qualität hervorgingen.

Zweckmässig wäre es, in gegebenen Fällen den höchsten Werth, hier y, zu wählen und nach diesem Verfahren die beiden niedern Spannungen zu berechnen.

25. Festigkeitsversuche von Bauschinger.

J. Bauschinger hat seine Versuche veröffentlicht unter dem Titel: „Mittheilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der techn. Hochschule in München. 13. Heft 1886.“ Das Heft enthält Versuche: „Ueber die Veränderungen der Elasticitätsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmal wiederholte Beanspruchung.“

Sehen wir, inwiefern diese letztern Versuche für uns in Betracht kommen. Der Plan war der: Aus einem Stück Material sollten Stäbe auf kaltem Weg herausgearbeitet werden; das eine der Stäbchen sollte auf der Werder'schen Maschine auf seine Elasticität und Festigkeit untersucht, die andern aber auf der Wöhler'schen Maschine so eingespannt werden, dass die obere Grenze der wiederholten Beanspruchung bei dem ersten in der Nähe der Elasticitätsgrenze lag, bei dem zweiten etwas höher u. s. w. Die untere Grenze war bei allen Versuchen Null. Von Zeit zu Zeit sollten die Stäbchen, nachdem sie einige Hunderttausend oder Millionen Anstrengungen erlitten hatten, aus der Wöhler'schen Maschine genommen und in der Werder'schen auf ihre Elasticitätsgrenze geprüft werden.

Man beachte: Nicht das Arbeitsvermögen, das dem Stäbchen nach so vielen wiederholten Anstrengungen verblieb, sollte bestimmt werden, sondern der Einfluss der Spannungswechsel auf die *Elasticitätsgrenze.* So wichtig nun auch die Kenntniss dieser Grenze ist, welche ein Konstruktionstheil während seines Bestehens annimmt, so erkennt man doch, dass die Bauschinger'schen Versuche nicht speciell unserer Aufgabe dienen. *Bei dieser handelt es sich um die allmählige Abnahme des Arbeitsvermögens eines Stabes, herbeigeführt durch Spannungswechsel jeder Art, solcher von langer wie kurzer Dauer, solcher, die ein Anspannen und Nachlassen der Spannung zeigen mit und ohne Gespanntbleiben zwischen beiden.*

Daher übergehen wir die Aufzählung der Versuche und beschränken uns auf die Mittheilung folgender Schlüsse.

1. „Wenn bei wiederholten Anstrengungen auf Zug, deren untere Grenze Null ist, die obere Grenze in der Nähe der ursprünglichen Elasticitätsgrenze liegt, so wird auch durch 5—16 millionenmalige Wiederholung dieser Anstrengung der Bruch nicht erreicht.“

Dieser Satz, wir wollen dies betonen, sagt nichts von „Bruchgrenze“, „unbegrenzter Dauer“, wie dies bei Wöhler der Fall ist. Jener Fassung des Satzes über die Wirkung der Spannungswechsel wird Jeder zustimmen können. Bauschinger führt vorsichtshalber

noch bei: Bei Anwendung dieses Satzes auf die Praxis ist nicht zu übersehen, dass das Material *vollständig fehlerfrei* sein muss. „Die geringsten Fehler, die ursprünglich nicht oder kaum bemerklich sein konnten, veranlassen, namentlich bei den homogenen Materialien (Flusseisen und Flussstahl), den Bruch schon nach einer verhältnissmässig geringen Zahl von Wiederholungen auch bei Anstrengungen, die unter oder nur wenig über der Elasticitätsgrenze liegen."

2. „Durch oftmal wiederholte Anstrengungen zwischen Null und einer obern Spannung, welche in der Höhe oder auch mehr oder weniger über der ursprünglichen Elasticitätsgrenze gelegen ist, wird diese gehoben und zwar bis über, manchmal weit über die obere Grenze der Anstrengungen hinaus und um so höher, je grösser die Anzahl der Anstrengungen ist, ohne jedoch eine gewisse Höhe überschreiten zu können."

Dieser Satz hat sich bestätigt. Wir fügen demselben bei: Die Steigerung der Elasticitätsgrenze durch Spannungswechsel erhöht keineswegs das Arbeitsvermögen des Materials, es verlangsamt nur den Verbrauch der aufgespeicherten Arbeitsfähigkeit.

3. „Wiederholte Anstrengungen zwischen Null und einer obern Grenze, welche die ursprüngliche Elasticitätsgrenze noch über ihre obere Spannung hinaus zu heben vermögen, führen den Bruch nicht herbei; wenn aber ihre obere Grenze so hoch liegt, dass die Elasticitätsgrenze nicht mehr darüber hinaus gehoben werden kann, so muss der Bruch nach einer beschränkten Anzahl solcher Anstrengungen erfolgen."

Bauschinger fügt sogleich bei: „Die praktische Wichtigkeit dieses Satzes, *wenn er sich bestätigt etc.*" Er wird sich nicht bestätigen. Der Bruch wird und muss erfolgen nach einer genügend wiederholten Anzahl von Spannungswechseln, selbst wenn die obere Grenze der Spannung unter der ursprünglichen oder spätern Elasticitätsgrenze liegt. Der Beweis für unsere Behauptung ist mit Wöhler'schen und Bauschinger'schen Spannungswechseln nur schwer zu führen; weit einfacher, schneller und sicherer aber durch Spannungswechsel der zweiten Art, mit lange andauernden Spannungen zwischen dem Steigen und Sinken der Spannung. Man wird sich einmal zu Versuchen dieser Art entschliessen müssen. Geschieht dies, so werden binnen Kurzem die Spintisationen mit der Wöhler'schen Bruchgrenze und den künstlichen Elasticitätsgrenzen aufhören.

4. „Die Zugfestigkeit zeigt sich durch millionen mal wiederholte Anstrengungen nicht vermindert, eher erhöht, wenn das Probe-

stück nach jenen Anstrengungen mit ruhender Belastung abgerissen wird."

Einverstanden. Allein wenn auch während der Spannungswechsel die Festigkeit gleich bleibt oder sogar grösser wird, so findet das auf Unkosten der Dehnungsfähigkeit und damit auch auf Unkosten des Arbeitsvermögens statt. Es wäre somit ein Irrthum, anzunehmen, es steige die Dauerhaftigkeit des Materials.

5. „Oftmal, millionenmal wiederholte Anstrengungen des Eisens und Stahls bringen keine Aenderung in der Struktur hervor. Die eigenthümlichen Zeichnungen, welche an Brüchen ersichtlich sind, die während solcher wiederholter Anstrengungen entstunden, rühren von einer Struktur-Aenderung her, die sich lediglich auf die äussere Oberfläche der Bruchstellen beschränkt."

Dass nach und nach eine andere Lagerung der kleinsten Theile durch Spannungswechsel eintreten muss, kann doch kaum bezweifelt werden; allein es ist begreiflich, dass die Aenderung erst in den späteren Stadien der Erschöpfung des Arbeitsvermögens bemerkbar wird. Der Bauschinger'sche Satz ist kein Beweis dafür, dass nicht Arbeitsvermögen durch wiederholte Spannungswechsel verloren gehe.

26. Ein Vorschlag.

(Veröffentlicht in der „Schweiz. Bauzeitung" vom 4. Nov. 1893.)

Vor einem Jahr erschien das 5. Heft der „Mittheilungen der Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien am eidg. Polytechnikum in Zürich", enthaltend den „Bericht über den Neubau, die Einrichtung und die Betriebsweise des schweiz. *Festigkeitsinstitutes*" von Herrn Prof. *Tetmajer*.

Mit Recht wird darin betont, dass die Gesetze der Festigkeit, welche die Theorie aufstellt, durch Versuche verificirt werden müssen; „experimentell müssen auch diejenigen Faktoren ermittelt werden, die die *Dauerhaftigkeit* der Materialien, somit die aus diesen hergestellten Konstruktionen beeinflussen." Allein man vermisst im Programm, so reichhaltig und zweckmässig dasselbe erscheinen mag, zwei Aufgaben. In der Kategorie „Metalle" (S. 50) liest man: „Zu Schlag- und *Dauerproben* ist das eidg. Institut derzeit nicht eingerichtet." Es ist das zu bedauern. Bereits gibt es zahlreiche Versuche über die Festigkeit von Eisen und Stahl, sowie über die Grösse der Ausdehnung dieser Materialien; dagegen fehlen noch sichere Gesetze über die *Haltbarkeit* der Eisenkonstruktionen während ihres Arbeitens. Die Versuche von Wöhler (1870) über die Anzahl von „Schwingungen", welche ein Stück Schmiedeisen oder Stahl aus-

halten kann, bevor es bricht, sind von hohem Werth; doch müssen die Schlüsse, welche Wöhler aus diesen Versuchen zieht, theilweise beanstandet werden; ebenso einige Schlüsse, welche Bauschinger (1886) aus seinen bezüglichen Versuchen ableitet.

Jeder Konstruktionstheil aus Eisen oder Stahl muss einmal brechen, wenn er eine hinreichend grosse Anzahl Spannungswechsel durchgemacht hat, selbst wenn die vorkommenden höchsten Spannungen innerhalb der Grenze der Elasticität liegen. Allein die Versuche von Wöhler und Bauschinger, die unter der letztern Voraussetzung dem Konstruktionstheil eine „unbegrenzte Dauer" beilegen, beziehen sich nur auf eine Art von Spannungswechseln, nämlich auf solche, die aus stetigem Anspannen und sofortigem stetigem Nachlassen bestehen und sich schnell vollziehen. Versuche aber mit Spannungswechseln von langer Dauer, namentlich solchen, bei denen zwischen Anspannen und Nachlassen die Spannung lange anhält, gibt es noch gar nicht. Und doch liegt das Bedürfniss für solche dringend vor. Der Einfluss einer lange anhaltenden Spannung zeigt sich bei den Stangen einer hydraulischen Presse, bei Dampfkesseln, bei Achsen, welche während der Ruhezeit (über Nacht z. B.) belastet bleiben, bei den Sägeblättern einer Bandsäge, bei Drahtseilen zur Kraftübertragung etc. Hier kann doch nicht von einer „unbegrenzten Dauer" des Konstruktionstheiles die Rede sein. Wenn die Feder einer Taschenuhr täglich aufgezogen wird, und sie bricht nach 30 Jahren, so macht sie nur $30 \cdot 365 = 10\,950$ Spannungswechsel durch, während eine Lokomotivachse während des Arbeitens deren 800 Millionen aushält, bevor sie ausgewechselt zu werden braucht. Es ist hohe Zeit, solche Erscheinungen aufzuklären.

Der Grund, warum im Programm des schweiz. Festigkeitsinstitutes nichts über Versuche dieser Art enthalten ist, mag der sein, weil solche Versuche Jahrzehnte lang andauern müssen, um Resultate zu liefern. Dadurch werden sie theuer. Bliebe aber kein anderer Weg übrig, um den Einfluss der Spannungswechsel verschiedener Art auf die Haltbarkeit zu ermitteln, so müssten Wissenschaft und Praxis es verlangen, dass Dauerversuche gedachter Art gemacht würden.

Allein es gibt noch einen andern Weg, der betreten werden könnte, um allmählig zu Resultaten zu gelangen.

Zahllose Theile aus Schmiedeisen und Stahl machen an Maschinen, Brücken etc. während Jahrzehnten Spannungswechsel durch, ohne dass sie einer Festigkeitsanstalt Unkosten verursachen, aber gleichwohl zu Untersuchungen benützt werden könnten. Einiges

mag auf diesem Wege schon geschehen sein, allein nur in vereinzelten Fällen. Es müsste dieses Vorgehen zur Aufgabe der Festigkeitsanstalt gehören, welche Plan und System hineinzubringen hätte.

In Fabriken bricht bald dieser, bald jener Theil einer Maschine, einer Transmission. Die Festigkeitsanstalt könnte sich mit einer Anzahl grösserer Etablissemente in Verbindung setzen, um Anzeige von solchen eingetretenen Brüchen zu erhalten. Die Anstalt hätte dann die zerbrochenen Theile zu untersuchen und soweit möglich Erhebungen zu machen über den ursprünglichen Zustand des Materials, über die Zeit, während welcher hindurch dasselbe arbeitete und über die Art und Intensität der Spannungswechsel, denen es ausgesetzt gewesen.

Es sollte der Festigkeitsanstalt die Möglichkeit geboten werden, solche Konstruktionstheile, die lange gearbeitet haben, auswechseln zu dürfen, um das ihnen noch verbliebene Arbeitsvermögen untersuchen zu können. Denken wir uns einen Dampfkessel, der bereits 20—40 Jahre im Betrieb steht. An diesem könnten Theile, welche den Tag über der hohen Spannung des Dampfes ausgesetzt sind und Nachts hindurch theilweise oder ganz entlastet werden, ausgewechselt werden, begreiflich zu einer Zeit, da der Betrieb nicht beeinträchtigt würde. Wir denken, unsere grossen Werkstätten würden hiezu Hand bieten und ebenso die Besitzer der Kessel. Vom Kessellieferanten erhielte man Angaben über die ursprüngliche Beschaffenheit des Materials, vom Besitzer Angaben über die Betriebsweise des Kessels, und die Festigkeitsanstalt hätte den jetzigen Zustand des Materials zu ermitteln. Es müsste sich dabei herausstellen, um wie viel das Arbeitsvermögen des Materials abgenommen, annähernd wie lange es noch hätte aushalten können, bis es in einen gefährlichen Zustand gekommen wäre. Es müssten am Kessel solche Theile ausgewählt werden, die nicht durch direkte Einwirkung des Feuers Schaden genommen, sondern solche, die nur durch den Dampfdruck gelitten hätten. Am meisten leiden aber jene Theile, die nicht blos auf einfachen Zug oder Druck in Anspruch genommen sind, sondern auf Zug und Biegung etc., wie dies z. B. der Fall war mit dem Boden des Dampfdomes, der auf dem Genfersee in Ouchy explodirte.

Was hier von Dampfkesseln gesagt ist, könnte geschehen mit Bestandtheilen einer Lokomotive, wie Achsen, Rahmen, Federn etc.; einer Dampfmaschine mit Kolbenstangen, Schubstange, Schwungradachse etc.; einer hydraulischen Presse mit den schmiedeisernen Stangen; einer Transmission; einer Eisenbahnbrücke u. s. w.

Endlich sollte die Festigkeitsanstalt bei Erstellung dieser oder jener Konstruktion Einsicht nehmen können von der Beschaffenheit des zu verwendenden Materials. Ueber diese Beschaffenheit würde die Anstalt ein Protokoll führen und in dieses auch jene Notizen eintragen, welche zeitweise, z. B. von fünf zu fünf Jahren, über den Zustand und die Verwendungsweise der Konstruktion erhoben würden. Dann könnten nach 20 und mehr Jahren einige Theile einer solchen kontrollierten Konstruktion ausgewechselt und die Abnahme des Arbeitsvermögens mit ziemlicher Sicherheit bestimmt werden.

Wohl jede seit langer Zeit bestehende Eisenwerkstätte macht in diesem Sinne ihre Erfahrungen. Allein diese Erfahrungen sind nicht gesammelt und durch die Wissenschaft nicht verwerthet. Auf dem angedeuteten Wege müsste man nach und nach zu einem reichen Material gelangen, aus dem Gesetze abgeleitet werden könnten zu Nutz und Frommen der Technik.

Diesen „Vorschlag“ sandten wir vor Abgang an die Redaktion der „Schweiz. Bauzeitung“ an einen hervorragenden Maschinen-Industriellen, mit dem Ansuchen, uns seine Meinung darüber mitzutheilen. Sofort kam folgende Antwort:

„Ihre werthen Zeilen vom 14. Sept. beantwortend, bin ich „der Meinung, dass sie den „Vorschlag“ machen sollten, und dass „etwas Werthvolles dabei herauskommen kann, allerdings erst nach „einer wahrscheinlich längeren Zeit; aber das soll nicht abhalten, „die Sache anzupacken; es liegt in ihrer Natur, dass sichere Resul„tate erst allmählig zu gewinnen sind. Die Eisenwerkstätten werden „sicher bereit sein, solche Versuche zu unterstützen. Die bisherigen „sind augenscheinlich nicht ausreichend; es braucht viel umfassendere, „bevor man mit Sicherheit Resolutionen darauf stützen kann. Der „Gegenstand ist es wohl werth, untersucht zu werden und zwar auf „breiter Grundlage, wie sie eben eine staatliche Prüfungsanstalt viel „besser organisiren kann, als einzelne Geschäfte, denen Zeit und „Ruhe, sowie die Vielseitigkeit dazu mangelt und die Aufgabe leicht „zu gross wird.

Hochachtungsvoll

Ihr *N. N.*“

Dass unser Vorschlag nicht so ganz aus der Luft gegriffen zu sein scheint, mögen folgende Aeusserungen zeigen, die uns kürzlich von einem diplomirten Maschinen-Ingenieur zugekommen sind:

„Es ist ganz entschieden zu wünschen, dass die von Ihnen „letztes Jahr gemachte Anregung Anklang finde, jene Anregung, es

„möchte die Festigkeitsanstalt mit Maschinenfabriken, Bahngesell-
„schaften etc. sich in Beziehung setzen zu dem Zwecke, über solche
„Konstruktionstheile, deren Beanspruchung man der Intensität und
„der Dauer nach kennt und kontroliren kann, genaue Statistik zu
„führen, um den Zusammenhang zwischen Arbeitsvermögen, Inten-
„sität und Dauer der Beanspruchungen, Art der Spannungswechsel
„und der Zwischenpausen mit Erfahrungsresultaten belegen zu
„können ..... So viel halte ich für sicher, dass die gesammte
„Technikerschaft nicht nur der Schweiz, sondern auch auswärts ein
„solches Unternehmen freudig begrüssen würden. Mönchenstein,
„Ouchy etc. sind eben Namen, deren Tragik man nicht so leicht
„vergessen kann."

27. Schluss.

Unsere Theorie beruht auf zwei Voraussetzungen: erstens das Material (hier Schmiedeisen und Stahl) ist nicht absolut vollkommen elastisch, daher bewirken Spannungswechsel molekulare Aenderungen, welche das Arbeitsvermögen schwächen, und zweitens bei lange dauernden Einwirkungen sind die molekularen Aenderungen auffallender als bei schnell vorübergehenden. Gibt man die Eigenschaft der unvollkommenen Elasticität zu, so muss unsere Hauptgleichung, ohne Rücksicht auf die Zeitfunktion, richtig sein. Betreffend diese Zeitfunktion, so liegt unsererseits ein Versuch vor, die Wirkung der Zeit auf die molekularen Vorgänge abzuschätzen. Ein blosser Versuch! Durch Experimente wird der Einfluss der Zeit festzustellen sein.

Unser Gesetz haben wir auf eine Reihe von Maschinentheilen angewendet und dadurch auf die Probe gestellt. Inwiefern es diese Probe bestanden hat, mögen die Leser entscheiden. Wir halten dafür, kein einziges der gewonnenen Resultate widerspreche der Wirklichkeit; einzelne derselben stimmen sogar in auffallender Weise mit der Erfahrung überein und wo etwas zu viel oder zu wenig gefunden wurde, ist die Abweichung von dem, was man erwarten kann, nicht so gross, um die Richtigkeit des Gesetzes in Frage zu stellen.

Zuvörderst darf konstatirt werden, dass bei den schnell verlaufenden Wöhler'schen Spannungswechseln unsere Gleichung Resultate gibt, die mit den Wöhler'schen übereinstimmen oder bei Material von mittlerer Güte nicht erheblich von ihnen abweichen. Die Resultate unserer Gleichung, auf solche Wechsel und solche Materialien angewendet, dürfen also auf eine gewisse Sicherheit Anspruch machen.

Allein wir können auch die Dauer von Konstruktionstheilen berechnen, wo uns die Wöhler'chen und Bauschinger'schen Lehren ganz im Stiche lassen. Was sollen wir mit der Wöhler'schen „Bruchgrenze“ anfangen, um die Dauer des Sägeblattes einer Bandsäge, eines Drahtseiles zur Kraftübertragung etc. zu erklären? Diese Beispiele mögen zeigen, wie eng gefasst das Wöhler'sche Programm war. Und dass seither Niemand darüber hinaus zu gehen wagte, ist auffallend. Die oben erwähnten Montgolfier und Seguin blieben mit ihren Beobachtungen vereinzelt. Selbst das Ansehen eines Poncelet, der sie auffrischte, drang nicht durch. Aber sind denn die Vorgänge an diesem Sägeblatt, am Drahtseil, am arbeitenden Dampfkessel etc. nicht auch einer Prüfung durch Experiment und Wissenschaft werth? Ist es nicht hohe Zeit, auch jene Schwächung in Anschlag zu bringen, welche das Material ausser der Betriebszeit erleidet, wenn es gespannt bleibt? Man hat diese so wichtigen Seiten der Festigkeitslehre vernachlässigt oder übersehen, man hatte ja die Versuche von Wöhler und Bauschinger! Vor einem Jahr schrieb die Redaktion einer angesehenen technischen Zeitschrift in dieser Frage: „Wir sind, gestützt auf die Versuche von Wöhler und Bauschinger, der Ansicht, dass bei *schmiedbarem* Eisen durch zahlreiche, wiederholte Anstrengungen innerhalb der Elasticitätsgrenze eine Abminderung des Arbeitsvermögens nicht (!) entsteht, selbst nicht bei den als ungünstig angesehenen Anstrengungen mit kurzen Ruhepausen.“ Die Geister stehen im Banne Wöhler's. Was über seine Versuche hinaus geht, muss sich entweder den Wöhler'chen Schlüssen fügen oder ist einer neuen selbstständigen Behandlung nicht werth.

Und doch ist das unbebaute Gebiet enorm weit. Es umfasst Konstruktionstheile und Konstruktionen, welche lange andauernden Spannungswechseln unterworfen sind. Hier wird sich zeigen, dass die Materialien nicht absolut vollkommen elastisch sind; hier muss sich zeigen, warum solche Theile nur eine geringe Anzahl von Spannungswechseln ertragen. Aus diesen Untersuchungen muss eine fast gänzliche Umwälzung unserer Konstruktionslehre hervorgehen.

THIS BOOK IS DUE ON THE LAST DATE STAMPED BELOW

AN INITIAL FINE OF 25 CENTS

WILL BE ASSESSED FOR FAILURE TO RETURN THIS BOOK ON THE DATE DUE. THE PENALTY WILL INCREASE TO 50 CENTS ON THE FOURTH DAY AND TO $1.00 ON THE SEVENTH DAY OVERDUE.

MAR 22 1937

MAR 23 1937

LD 21–100m-8,'34

G amometer

D gewehr

YC 12960

Gaylord Bros.
Makers
Syracuse, N. Y.
PAT JAN. 21, 1908

UNIVERSITY OF CALIFORNIA LIBRARY

THIS BOOK IS DUE ON THE LAST DATE STAMPED BELOW

AN INITIAL FINE OF 25 CENTS

WILL BE ASSESSED FOR FAILURE TO RETURN THIS BOOK ON THE DATE DUE. THE PENALTY WILL INCREASE TO 50 CENTS ON THE FOURTH DAY AND TO $1.00 ON THE SEVENTH DAY OVERDUE.

MAR 22 1937

MAR 23 1937

LD 21–100m-8,'34

YC 12960

Gaylord Bros.
Makers
Syracuse, N. Y.
PAT JAN. 21, 1908

UNIVERSITY OF CALIFORNIA LIBRARY

THIS BOOK IS DUE ON THE LAST DATE STAMPED BELOW

AN INITIAL FINE OF 25 CENTS

WILL BE ASSESSED FOR FAILURE TO RETURN THIS BOOK ON THE DATE DUE. THE PENALTY WILL INCREASE TO 50 CENTS ON THE FOURTH DAY AND TO $1.00 ON THE SEVENTH DAY OVERDUE.

MAR 22 1937	
MAR 23 1937	

LD 21–100m-8,'34

YC 12960

Gaylord Bros.
Makers
Syracuse, N. Y.
PAT JAN. 21, 1908

UNIVERSITY OF CALIFORNIA LIBRARY